

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij Rudarstva

MODELIRANJE DINAMIČKOG PROBNOG OPTEREĆENJA PILOTA  
NA LOKACIJI ILICA

Diplomski rad

Vilim Mufić

R-220

Zagreb, 2019.

## MODELIRANJE DINAMIČKOG PROBNOG OPTEREĆENJA PILOTA NA LOKACIJI ILICA

Vilim Mufić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Sažetak

Duboko temeljenje primjenjuje se kod složenijih građevinskih zahvata ili kada temeljno tlo na dohvatljivoj dubini nema svojstva koja mogu zadovoljiti traženu kakvoću s obzirom na slijeganja i/ili nosivost. Ono je primijenjeno u slučaju projekta izgradnje smještajne građevine HVU Petar Zrinski na lokaciji Ilica. Provedeno je ispitivanje nosivosti pilota dinamičkim postupkom. Ispitan je armiranobetonski pilot promjera 150 cm i duljine 23 m. Ispitivanje se vrši ispuštanjem čekića mase 12 t s određene visine (0,25-3 m). Na pilot su pričvršćeni senzori za mjerenje deformacije i akceleracije, postavljeni oko 1,50 m pod glavom pilota. Odabran je jedan udarac koji je snimljen i obrađen. Zabilježen je trajni pomak pilota od 2,50 mm. Ukupna nosivost pilota iznosi 11390,5 kN. Napravljen je model tog ispitivanja u programu za numeričko modeliranje, Plaxisu. Model tla dubine je 28,6 m, i sastoji se od sedam slojeva gline različitih karakteristika i jednog sloja šljunka. Modelirano je dinamičko opterećenje od 30000 kN. Proveden je proračun u četiri faze. Dobiven je trajni pomak od 21 mm, a maksimalni trenutni pomak od 33 mm. Ukupna sila duž plašta pilota iznosi 5910,3 kN što je ispod proračunate nosivosti plašta od 8998 kN.

Ključne riječi: numeričko modeliranje, Plaxis, lokacija Ilica, piloti, model

Završni rad sadrži: 41 stranica, 9 tablica, 20 slika, i 18 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF

Dr. sc. Želimir Veinović, docent RGNF

Dr. sc. Mario Klanfar, docent RGNF

## MODELLING DYNAMIC LOAD TEST OF A PILE ON LOCATION ILICA

Vilim Mufić

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of mining engineering and geotechnics  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Abstract

Deep foundations are used in complicated civil engineering operations or when the foundation soil's characteristics can't satisfy the request for capacity and subsidence. Piles are used as a foundation for a housing unit HVU Petar Zrinski at Ilica. The dynamic test of bearing capacity was conducted. The tested pile is made of reinforced concrete, its' radius 150 cm and length of 23 m. The test is conducted by releasing a 12 t hammer from a certain height (0,25-3 m). At 2,50 m below the head of the pile sensors for acceleration and deformation were fitted. One blow was chosen and analyzed. Permanent subsidence of the pile was 2,50 mm. Total capacity of the pile was 11390,5 kN. This test was modeled in Plaxis, numerical modeling program. Soil model is 28,6 m deep and it consists of seven layers of clay and one layer of gravel. Dynamic stress of 30000 kN is applied to the modeled pile. Calculations are carried out in four phases. Permanent subsidence of 21 mm is obtained and maximum subsidence of 33 mm. Total force along the casing of pile is 5910,3 kN which is less than the calculated bearing capacity of the pile of 8998 kN.

Keywords: numerical modeling, Plaxis, location Ilica, piles, model

Thesis contains: 41 pages, 9 tables, 20 figures, and 18 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Asst. prof. Dubravko Domitrović, PhD

Reviewers: Asst. prof. Dubravko Domitrović, PhD  
Asst. prof. Želimir Veinović, PhD  
Asst. prof. Mario Klanfar, PhD

Defence date: September 20, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. ISTRAŽNE RADNJE PRILIKOM IZRADE PILOTA .....	2
2.1. Planiranje .....	2
2.2. Dubina istraživanja .....	2
2.3. Podzemna voda.....	3
2.4. Uzorkovanje, in-situ i laboratorijski pokusi .....	4
2.5. Metode istraživanja različitih tipova tla .....	5
2.5.1. Tvrde raspucane gline.....	5
2.5.2. Sitnozrnato tlo.....	6
2.5.3. Krupnozrnato tlo .....	6
2.6. Zapunjavanje istražnih bušotina .....	7
2.7. Radna platforma .....	8
3. METODE IZRADE PILOTA.....	9
3.1. Tipovi pilota .....	9
3.2. Razmičući piloti.....	9
3.2.1. Prethodno izrađeni razmičući piloti.....	9
3.2.2. Prethodno izrađeni armirano-betonski piloti .....	10
3.2.3. Spojni piloti .....	10
3.2.4. Prethodno izrađeni čelični piloti.....	11
3.2.5. Zabijeni, lijevani, razmičući piloti.....	11
3.2.6. Vijčani, lijevani, razmičući piloti .....	12
3.3. Metode zabijanja pilota .....	13
3.3.1. Padajući čekić .....	13
3.3.2. Zabijanje pilota dizel čekićem.....	15
3.4. Nerazmičući piloti .....	15
3.4.1. Bušeni, lijevani piloti.....	15
3.4.2. Piloti kontinuiranog svrdla .....	16
3.5. Mikropiloti.....	18
4. PROJEKTIRANJE PILOTA .....	19
4.1. Aksijalna nosivost pilota .....	19
4.1.1. Nosivost u krupnozrnatim tlima .....	20
4.1.2. Nosivost u sitnozrnatim tlima.....	21

4.1.3. Dinamička analiza zabijanja pilota.....	21
5. DINAMIČKO TESTIRANJE PILOTA .....	22
5.1. Analiza valne jednadžbe .....	22
5.2. Podaci o dinamičkom naprezanju valova .....	24
6. DINAMIČKO TESTIRANJE PILOTA – PRIMJER.....	25
6.1. Ispitivanje nosivosti pilota dinamičkim postupkom .....	25
7. MODEL DINAMIČKOG TESTIRANJA PILOTA.....	29
7.1. Model tla i proračun .....	29
7.2. Rezultati proračuna.....	35
8. ZAKLJUČAK.....	39
9. LITERATURA .....	40

## POPIS SLIKA

Slika 2-1 Vertikalne envelope naprezanja za temeljnu ploču poduprtu pilotima.....	3
Slika 2-2 Korelacija otpora stošca i SPT N vrijednosti. 1, Meigh i Nixon; 2, Meyerhof; 3, Rodin; 4, Schmertman; 5, Shulze i Knausenberger; 7, Thorburn i McVicar (Fleming et al., 2009).....	7
Slika 3-1 Primjer pilota sa «H» presjekom (b – širina, h – visina, r – radijus zakrivljenosti spoja, d – duljina štapa, $t_w$ – širina štapa, $t_f$ – širina noge) .....	11
Slika 3-2 Izrada pilota tipa «Frenki» .....	12
Slika 3-3 Sistem izrade vijčanih, lijevanih, razmičućih pilota .....	13
Slika 3-4 Junttan PM20LC stroj za zabijanje betonskih, drvenih i čeličnih pilota (Junttan Oy, 2019).....	14
Slika 3-5 Lijevanje betona tremie metodom.....	16
Slika 3-6 Stroj za izradu pilota s kontinuiranim svrdlom Geax EK90 (Piling Equipment ltd., 2018).....	17
Slika 6-1 Ispitivanje probnog pilota promjera 150 cm (Matković, 2017) .....	26
Slika 6-2 Glava pilota s utegom i ugrađenim senzorima (Matković, 2017).....	27
Slika 6-3 Model pilota i tla u sklopu analize valne jednadžbe (Pile Dynamics inc., 2019) .....	28
Slika 7-1 Model tla sa pilotom .....	30
Slika 7-2 Simulacija dinamičkog opterećenja udarca bata pomoću harmonic multiplera .	32
Slika 7-3 Uvjeti podzemne vode na modelu.....	32
Slika 7-4 Detalj modela sa odabranim točkama .....	34

Slika 7-5 Deformirana mreža .....	35
Slika 7-6 Prikaz ukupnih pomaka po y osi .....	36
Slika 7-7 Krivulje pomaka po y osi za 4 karakteristične točke .....	37
Slika 7-8 Glavna efektivna naprezanja .....	37
Slika 7-9 Krivulje brzine u ovisnosti o dinamičkom vremenu .....	38

## POPIS TABLICA

Tablica 2-1 Tipični in-situ pokusi i njihova primjena u projektiranju pilota .....	5
Tablica 3-1 Tipične čvrstoće za prethodno izrađene armirano-betonske pilote pri normalnim uvjetima zabijanja (Fleming et al., 2009) .....	10
Tablica 6-1 Rezultati ispitivanja nosivosti pilota dinamičkim postupkom (Matković, 2017) .....	28
Tablica 6-2 Prikaz interpretirane ukupne granične nosivosti ispitanog pilota (Matković, 2017) .....	28
Tablica 7-1 Karakteristike materijala korištene za izradu modela tla (Mateković, 2015) ..	29
Tablica 7-2 Ostale karakteristike slojeva tla iz modela (Mateković, 2015) .....	31
Tablica 7-3 Parametri korišteni u zadavanju faza .....	33
Tablica 7-4 Vrijednosti koeficijenta $R_{inter}$ (Fine Spol s.r.o., 2019) .....	33
Tablica 7-5 Maksimalna posmična naprezanja na dodiru tla i pilota .....	38

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$b$	m	širina «H» presjeka
$h$	m	visina «H» presjeka
$r$	m	radijus zakrivljenosti spoja
$d$	m	duljina stupa «H» presjeka
$tw$	m	širina stupa «H» presjeka
$t_f$	m	širina noge «H» presjeka
$A_b$	m <sup>2</sup>	površina baze pilota
$q_b$	kN/m <sup>2</sup>	naprezanje na bazu pilota
$A_s$	m <sup>2</sup>	površina plašta
$\bar{\tau}_s$	kN/m <sup>2</sup>	prosječno ograničavajuće posmično naprezanje plašta
$r_0$	m	polumjer pilota
$d$	m	promjer pilota
$l$	m	duljina pilota u tlu
$r_s$	kN/m <sup>2</sup>	naprezanje na plašt pilota
$Q$	kN	nosivost pilota
$Q_b$	kN	nosivost baze pilota
$Q_s$	kN	nosivost plašta pilota
$\sigma'_n$	kN/m <sup>2</sup>	normalno efektivno naprezanje na plašt pilota
$\delta$	°	kut trenja između pilota i tla
$K$	-	omjer vertikalnog i normalnog efektivnog naprezanja
$\sigma'_v$	kN/m <sup>2</sup>	vertikalno efektivno naprezanje na plašt pilota
$c_u$	kN/m <sup>2</sup>	nedrenirana posmična čvrstoća
$q_b$	kN/m <sup>2</sup>	naprezanje na bazu pilota
$(AE)_p$	N/m	krutost poprečnog presjeka pilota
$c$	m/s	brzina prolaska vala kroz pilot
$w$	m	vertikalni pomak pilota
$z$	m	udaljenost duž pilota
$t$	s	varijabla vremena
$F$	kN	sila u pilotu
$s_{u,ref}$	kN/m <sup>2</sup>	nedrenirana posmična čvrstoća
$q_u$	kN/m <sup>2</sup>	jednoaksijalna čvrstoća

$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$E$	Pa	Youngov modul elastičnosti
$A$	m <sup>2</sup>	površina
$m_i$	kg	masa tla
$k_i$	N/m	krutost opruge
$\Delta L$	m	debljina sloja



## 1. UVOD

Duboko temeljenje primjenjuje se kod složenijih građevinskih zahvata ili kada temeljno tlo na dohvatljivoj dubini nema svojstva koja mogu zadovoljiti traženu kakvoću s obzirom na slijeganja i/ili nosivost. Zbog svoje složenosti i potencijalne štete u slučaju sloma duboki temelji zahtijevaju detaljno provedene istražne radnje. Provode se terenska ispitivanja, uzorkovanje, in-situ i laboratorijski pokusi. Cilj je istraživačkim radovima skupiti sve podatke potrebne za projektiranje pilota.

Piloti se dijele na razmičuće i nerazmičuće pilote. Kod razmičućih (uglavnom zabijenih) pilota tlo se radijalno razmiče prilikom penetracije pilota. Nerazmičući piloti najčešće nastaju bušenjem i zapunjavanjem bušotine betonom.

Presudnu ulogu u odabiru tipa i dimenzija pilota igrati će praktični i ekonomski faktori. Za svakog razmatranog pilota potrebno je provesti analizu kako bi se zaključilo da li će na zadovoljavajući način ispuniti svoju funkciju elementa temeljenja. Ta analiza najčešće uključuje proračun nosivosti i procjenu ostalih potencijalnih problema.

Po završetku izrade pilota potrebno je provesti testiranje kojim se dokazuje njegova kvaliteta. Ispitivanje nosivosti dinamičkim postupkom relativno je jednostavan i jeftin pokus. Oprema se sastoji od dizalice pomoću koje se uteg određene mase diže na određenu visinu te ga se potom pušta da padne na vrh pilota. Mjeračima naprezanja i deformacija postavljenim na pilot prikupljaju se podaci koji se potom obrađuju na računalu.

## **2. ISTRAŽNE RADNJE PRILIKOM IZRADE PILOTA**

### **2.1. Planiranje**

Planiranje istražnih radnji u svrhu izrade pilota slično je onome kod plitkog temeljenja, sa očiglednom razlikom potrebe za većom dubinom istraživanja. Glavni dodatni faktori koji se trebaju razmotriti su praktični aspekti ugradnje pilota, uključujući potrebu za izgradnjom radne platforme za ugradnju pilota.

Prva faza u planiranju istražnih radnji uključuje provođenje kabinetskih studija s ciljem prikupljanja postojećih podataka. U slučaju da podaci nisu dostupni potrebno je staviti veći naglasak na istražne radnje. U drugoj fazi vrši se pregled lokacije kako bi se potvrdili podaci dobiveni kabinetskom studijom i kako bi se skupio što veći broj preliminarnih opažanja.

Istraživački radovi trebaju uzeti u obzir projektne parametre pilota ukoliko oni postoje, uključujući otpornost na slijeganje, budući da oni imaju utjecaj na njihov opseg. U slučaju da ne postoje projektni parametri istražne radnje moraju biti provedene toliko detaljno da se iz dobivenih podataka može pristupiti projektiranju temelja. Glavni zahtjev istražnih radnji u svrhu projektiranja pilota je pružiti opsežne podatke do dubine ispod stope pilota. Jednako je važno prikupiti podatke o podzemnoj vodi, njene pojave i reakcije tijekom operacije bušenja.

Prilikom izrade pilota u dobro istraženim homogenim tlima najčešće se može još u fazi planiranja odrediti broj i dubina bušotina. Kod kompliciranijih uvjeta poželjno je pristupiti izradi u dvije faze, kod koje se druga faza bazira na saznanjima iz prve. Kod zahtjevnijih projekata sa velikim brojem pilota često je finansijski isplativije izvesti određen broj testnih pilota kao dio istraživačkih radova.

Specifični aspekti koji se trebaju uzeti u obzir su seizmička aktivnost područja, agresivnost tla, mogućnost zagađena vodonosnika, ako piloti probuše onečišćeno tlo. Također se mora obratiti pažnja na dozvoljenu razinu buke, temelje okružujućih struktura i njihovu osjetljivost.

### **2.2. Dubina istraživanja**

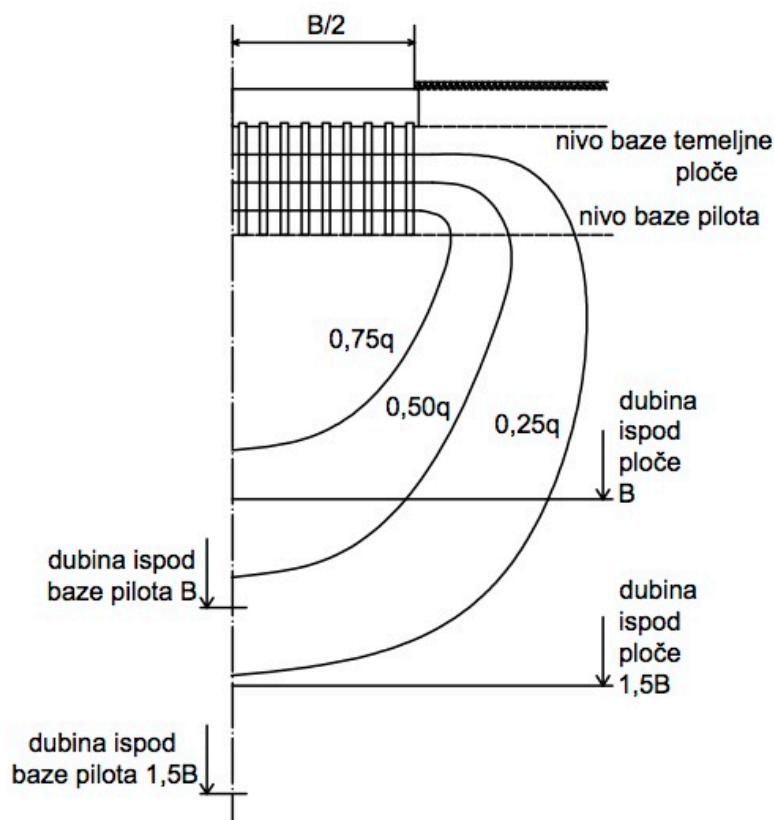
Opseg istražnih radnji nije ograničen samo na zonu koja je direktno pod utjecajem opterećenih pilota, nego ovisi i o drugim faktorima kao što su opća stabilnost, potreba za razumijevanjem režima podzemne vode, heterogenog tla ili utjecaja na okolne građevine.

U slučaju temeljne ploče poduprte pilotima velika naprezanja se prenose do velike dubine kao što je prikazano na slici 2-1. U tom slučaju preporuča se da je dubina istraživanja barem jedan i pol puta veća od širine opterećene površine.

Kada je potrebna ugradnja pilota u nosivi sloj male debljine (npr. šljunčani sloj na sloju gline) važno je izvesti veliki broj bušotina, na što manjem razmaku. Njima se utvrđuje da li su zadovoljeni položaj i debljina sloja duž cijele površine opterećenja. Također je bitno utvrditi sposobnost nosivog sloja da izdrži naprezanja.

### 2.3. Podzemna voda

Rezultati istraživanja podzemne vode mogu utjecati na izbor tipa pilota, stoga je važno da izvođač pilota ima podatke potrebne za ispravno ocjenjivanje protoka koji se očekuje tijekom ugradnje pilota.



**Slika 2-1** Vertikalne envelope naprezanja za temeljnu ploču poduprtu pilotima

Preporuča se bilježenje dubina bušotine na kojima se zapaža protjecanje i skupljanje vode. Taj podatak rijetko ukazuje na stvarno hidrostatičko stanje, ali nudi korisne informacije izvođaču bušotina.

Neka sitnozrnata, niskopropusna tla omogućavaju relativno brz napredak bušenja bez pojave vode za vrijeme dok je bušotina otvorena (npr. prašinasta glina kao što je Londonska glina). Pri tome, potrebno je obratiti pažnju na postojanje visokopropusnih proslojaka mulja ili pijeska koji bi doveli do brzog nakupljanja vode u bušotini. Kod bušotina u homogenim glinama treba paziti da svojom dubinom ne zahvate donji, vodonosni sloj.

Razina podzemne vode varira ovisno o godišnjem dobu. Ako je moguće, preporuča se praćenje razine kroz nekoliko karakterističnih mjeseci, pogotovo onih sa više padalina.

U slučaju slojeva visokopropusnog šljunka postoji opasnost od erozije betona odmah nakon lijevanja. Postoje načini sprečavanja takve erozije, međutim da bi ih se provelo mora se unaprijed znati da postoji mogućnost da se to dogodi, odnosno mora se utvrditi postojanje takvih slojeva. Ovakva situacija zna se događati u aluvijalnim šljuncima s nedostatkom sitnog materijala.

Kemijska agresivnost spram čeličnih i betonskih pilota moguća je zbog rastopljenih soli u kiseloj podzemnoj vodi. Uzorci podzemne vode moraju se uzimati iz bušotina tako da ostanu neporemećeni ili razrijeđeni vodom koja se dodaje tijekom bušenja. Ekstremno korozivni uvjeti pojavljuju se kod odlagališta otpada kamenoloma ili rudnika, i u tim slučajevima treba obratiti više pažnje.

## **2.4. Uzorkovanje, in-situ i laboratorijski pokusi**

Upute za odabir položaja uzoraka, njihovu veličinu, tipa opreme za uzorkovanje i intervala između in-situ pokusa nalaze se u B5930, 4.3. U tablici 2-1 nabrojani su tipični in-situ pokusi i njihova primjena u projektiranju pilota.

Često se koriste in-situ statički i dinamički penetracijski pokus, pogotovo standardni penetracijski pokus (SPT) i statički penetracijski pokus (CPT), budući da se iz njihovih rezultata može direktno pristupiti projektiranju pilota. Ukoliko tlo ne sadrži cementirani materijal ili veće komade stijene bolje je koristiti statički penetracijski pokus nego standardni, pogotovo jer se sve više metoda projektiranja pilota veže uz otpor stošca.

**Tablica 2-1** Tipični in-situ pokusi i njihova primjena u projektiranju pilota

<i>In- situ pokus</i>	<i>Primjena u projektiranju pilota</i>
Krilna sonda	Za mjerenje in-situ nedrenirane čvrstoće u mekim do čvrstim glinama. Rezultati se mogu primijeniti za procjenu slijeganja pilota. Čvrstoća zbijene, osjetljive gline može imati utjecaja na općenitu stabilnost povezanu sa ugrađivanjem pilota u meku glinu.
Standardni penetracijski pokus (SPT)	Istraživanje debljine nosivog sloja. Direktna primjena N-vrijednosti u empirijskim formulama za izračun maksimalnog naprezanja pilota. Procjena kuta trenja u zrnatim tlima. Gruba procjena kohezije u krutim glinama. Za procjenu tlačne čvrstoće vrlo slabe stijene.
Statički penetracijski pokus	Direktna primjena trenja plašta i otpora stošca u projektiranju pilota. Procjena posmične čvrstoće glina i izrada detaljnih profila tla.
Presiometar	Procjena modula tla za primjenu u projektiranju pilota, ali rezultati nisu uvijek primjenjivi. Procjena posmične čvrstoće slabe stijene.
Opterećenje kružnom pločom	Daje posmičnu čvrstoću i module čvrstoće u svim tipovima tla. Parametri posmične čvrstoće vrlo su bitni u projektiranju pilota, budući da se opterećuju slični volumeni tla. Vrijednosti modula ne moraju biti toliko točni jer se ti parametri često poremete tijekom ugradnje pilota. Važno je da se ovaj pokus pažljivo izvodi.
Pokusi propusnosti	Za procjenu protoka u propusnim šljuncima i raspucanim stijenama. To može biti relevantan faktor u odabiru tipa pilota. Pokus je također primjenjiv u slabim stijenama, za otkrivanje visoke raspucanosti.

## 2.5. Metode istraživanja različitih tipova tla

U sljedećim podpoglavljima biti će prikazane odgovarajuće metode istraživanja ovisno o tipu tla. Ponekad situacija u tlu odgovara opisanim tipovima, međutim, najčešće se nailazi na mješavinu različitih tipova i tada se primjenjuje kombinacija metoda. Projektiranje pilota ovisi o uvjetima u tlu i da bi se primijenile poznate metode projektiranja potrebno je dobro poznavati svojstva tla.

### 2.5.1. Tvrde raspucane gline

U ovim tlima najčešće se ugrađuju piloti izrađeni u tlu i zabijeni piloti sa malom istisninom. Trenutačno se projektiranje pilota bazira na vrijednostima nedrenirane čvrstoće dobivene troosnim pokusom na neporemećenim uzorcima, koristeći metodu « $\alpha$ » adhezijskih faktora. Veliki raspon posmičnih čvrstoća posljedica je pukotina i poremećenih uzoraka, stoga je potrebno provesti dovoljan broj pokusa da se može izračunati srednja vrijednost, gornja i donja granica profila čvrstoće bez previše pretpostavki.

U raspucanim glinama veličina uzorka i njegova orijentacija utječu na rezultate ispitivanja čvrstoće. Ako se koristi « $\alpha$ » metoda, koristeći  $\alpha$  vrijednosti koje je predložio Skempton (1959), troosni nedrenirani pokus bi se trebao izvoditi na uzorcima promjera 38 mm uzetih iz U100 uzoraka. Treba obratiti pažnju na činjenicu da će stvarna čvrstoća tla ispod pilota biti manja nego ona dobivena laboratorijskim ispitivanjima. Procjene modula dobivene laboratorijskim ispitivanjima su približne, čak i rezultati pokusa s kružnom pločom ne moraju biti u potpunosti reprezentativni.

Od novijih metoda koje se koriste u određivanju parametara deformacije i čvrstoće iz in-situ pokusa, tu su: samobušajući presiometar «Camkometer» ili Marchettijev dilatometar. Daljnje informacije o pokusima sa presiometrom mogu se naći u Mair i Woods (1987).

Kada se projektiranje pilota bazira na metodama efektivnih naprežanja, uzorkovanje mora uključiti materijal za konsolidirani nedrenirani pokus, sa mjerenjem tlaka vode u porama, kako bi se procijenili parametri efektivne čvrstoće kao što je kut trenja  $\phi'$ . Za zabijene pilote prstenasti posmični pokus pruža korisne informacije o kutu trenja između pilota i tla (Ramsey et al., 1998).

#### 2.5.2. Sitnozrnato tlo

Kako bi se dobili parametri za projektiranje pilota, sitnozrnata tla kao što su pijesci i muljevi, najčešće se istražuju in-situ pokusima. Postoji mogućnost provođenja SPT pokusa i procjene nosivosti pilota na temelju dobivenih  $N$  vrijednosti. Međutim, u debljim slojevima sitnog pijeska i mulja, statičkim penetracijskim pokusom (CPT) dobiva se pouzdaniji profil tla. Ovom metodom može se izbjeći problem koji nastaje kada se SPT koristi u bušotinama kod kojih postoji procjeđivanje u dnu, koje dovodi do porasta niskih  $N$  vrijednosti. Također, nije potrebna korekcija zbog trenja šipki, već se promatra otpor stošca  $q_c$  i otpor plašta  $f_s$ , koji se mogu koristiti za projektiranje zabijenih pilota. Napravljen je niz korelacija između SPT  $N$  vrijednosti i otpora stošca  $q_c$  koje su sažete na slici 2-2.

#### 2.5.3. Krupnozrnato tlo

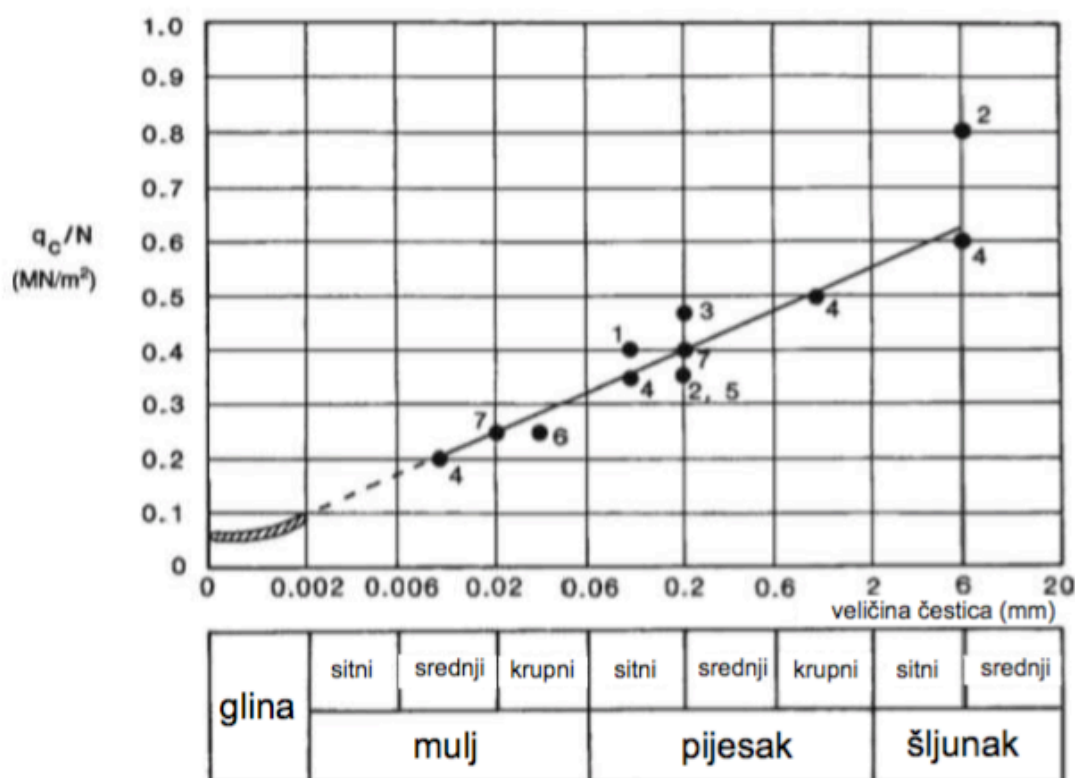
U ovoj vrsti tla često se vrše ispitivanja standardnim penetracijskim pokusom (SPT), ali može se koristiti i CPT. Normalno je pri projektiranju pilota koristiti empirijske metode koje se baziraju na rezultatima penetracijskih pokusa. Kad je raspon veličina čestica velik i tlo sadrži sitniju frakciju rezultati penetracijskih pokusa mogu biti varljivi. U takvom tlu tlak podzemne vode može izazvati oslabljenje u dnu bušotine što dovodi do promjena

vrijednosti penetracije ukoliko se ne provedu prikladne mjere opreza. Mjere opreza uključuju punjenje bušotina vodom i čišćenje dna bušotine, ali usprkos njima može doći do smanjenja N vrijednosti. Niske vrijednosti mogu dovesti do pretjeranog opreza pri projektiranju, ali i do prevelikog otpora pri zabijanju pilota.

## 2.6. Zapunjavanje istražnih bušotina

Na lokacijama na kojima je velika vjerojatnost izvođenja pilota mora se provesti pažljivo zapunjavanje bušotina. Ovo je posebno važno u slučaju da postoji mogućnost gubitaka građevnog materijala pilota zbog veze sa vodonosnim slojem kroz loše zapunjenu istražnu bušotinu. U krupnozrnatim tlima ovo može biti popraćeno gubitkom okolnog tla.

Kada je vjerojatnost nailaska na loše zapunjenu bušotinu velika, predlaže se zapunjavanje cementom, ili jalovinom i čepovima od zbijene gline.



**Slika 2-2** Korelacija otpora stošca i SPT N vrijednosti. 1, Meigh i Nixon; 2, Meyerhof; 3, Rodin; 4, Schmertman; 5, Shulze i Knausenberger; 7, Thorburn i McVicar (Fleming et al., 2009).

## **2.7. Radna platforma**

Stroj za ugradnju pilota se tijekom rada treba nalaziti na radnoj platformi. Radna platforma sastoji se od zbijenog zrnatog materijala, a njen cilj je omogućiti sigurne radne uvjete. Izrada radne platforme nije potrebna ako već postoji čvrsta podloga ili ako se koriste drveni podmetači koji se mogu pomicati po gradilištu. Ti podmetači nisu jednako efikasni kao dobro projektirana radna platforma i često usporavaju radni proces, trebaju se koristiti samo ako nije moguća izvedba radne platforme.

Za propisno projektiranje radne platforme potrebno je dobro poznavanje svojstava tla do male dubine. Potrebno je provesti detaljno istraživanje tla do male dubine (npr. istražni raskopi) sa uzorkovanjem i odgovarajućim pokusima, kako bi se dobili podaci kao što su nedrenirana posmična čvrstoća ili profil relativne gustoće. Treba paziti da se dobro prilikom zapunjavanja istražnih raskopa materijal dobro zbije. Osim istražnih radnji treba provesti i kvalitetnu kabinetsku studiju kako bi se otkrile lokacije potencijalnih zapunjavanja prijašnjih iskopa (npr. instalacije, podrumi, zakopani rezervoari).



### 3. METODE IZRADE PILOTA

Dvije osnovne metode izvođenja pilota su zabijanje prethodno izrađenih pilota ili iskop i zapunjavanje betonom. Druge metode su se razvile iz ove dvije osnovne kako bi se odgovorilo na različite kompleksne geološke ili hidrogeološke uvjete, ekonomske ili tehničke zahtjeve.

Najveći napredak ostvaren je na području automatizacije strojeva za izradu pilota. Postupak izrade pilota je u današnje vrijeme kompjutorski nadgledan do visoke mjere, a neki dijelovi postupka kao što je betoniranje su ponekad u potpunosti automatizirani. Ovo otvara mogućnost da se u bliskoj budućnosti već za vrijeme bušenja izrađuje profil tla i ocjenjuje nosivost pilota, te pomoću toga odlučuje o optimalnoj duljini pilota.

#### 3.1. Tipovi pilota

U prošlosti, bilo je moguće klasificirati pilote na «zabijene» i «bušene». Ova klasifikacije se povremeno i dalje može koristiti, ali često ne odgovara širokom spektru pilota koji su danas u upotrebi. Podjela na «razmičuće» i «nerazmičuće» mnogo se bolje nosi sa današnjom situacijom.

Kod razmičućih (uglavnom zabijenih) pilota tlo se radijalno razmiče prilikom penetracije pilota. Može biti prisutna i komponenta kretanja tla u vertikalnom smjeru. Proces razmicanja kao posljedicu ima zbijanje krupnozrnatog tla, dok je kod glinovitog tla trenutna promjena volumena mala, ali može doći do bubrenja.

Kod nerazmičućih (uglavnom bušenih) pilota uzdužna naprezanja u tlu se smanjuju iskopom, i samo djelomično vraćaju na prijašnju razinu nakon betoniranja. Kod ovog tipa ne postoje nedostaci koji su vezani uz razmicanje tla, ali također nema ni pozitivnog efekta zbijanja krupnozrnatog tla. Također, kao nusprodukt dobiva se jalovina, čije uklanjanje sa gradilišta može biti skupo.

#### 3.2. Razmičući piloti

##### 3.2.1. Prethodno izrađeni razmičući piloti

Sažeta podjela prethodno izrađenih razmičućih pilota dana je u nastavku.

- (a) Betonski: armirani, pune duljine (prenapregnuti)
  - spojni (armirani)
  - šuplji (cjevasti)
- (b) Čelični: «H» presjek
  - cjevasti presjek
  - ostali (npr. vijčani piloti)

### 3.2.2. Prethodno izrađeni armirano-betonski piloti

Prethodno izrađeni betonski piloti uglavnom su spojnog tipa, osim u slučaju velikog projekta kod kojega se isplati izrada pilota na gradilištu, kako bi se izbjegli problemi sa transportom. Prethodno izrađeni piloti najčešće su kvadratnog presjeka, do maksimalnih  $600 \times 600$  mm, pri čemu podnose naprezanje od 3000 kN u odgovarajućem tlu. Tipične dimenzije i čvrstoće dane su u tablici 3-1.

**Tablica 3-1** Tipične čvrstoće za prethodno izrađene armirano-betonske pilote pri normalnim uvjetima zabijanja (Fleming et al., 2009)

Četverokutni presjek pilota (mm)	Tipična čvrstoća (kN)
200 x 200	400
250 x 250	500
275 x 275	750
300 x 300	900
350 x 350	1200

### 3.2.3. Spojni piloti

Segmenti spojnih pilota obično se nalaze u rasponu od 5 do 14 m duljine. Oni se međusobno spajaju na različite načine: «bajoneta» spojem, klinastim spojem, a ponekad se koristi i epoksi smola. Kod robusnijih vrsta spojeva, spoj je jednako čvrst kao i pilot i ima jednaku otpornost na momente. Kod slabijih spojeva, kao što je onaj sa epoksi smolom, potreban je veći oprez prilikom zabijanja.

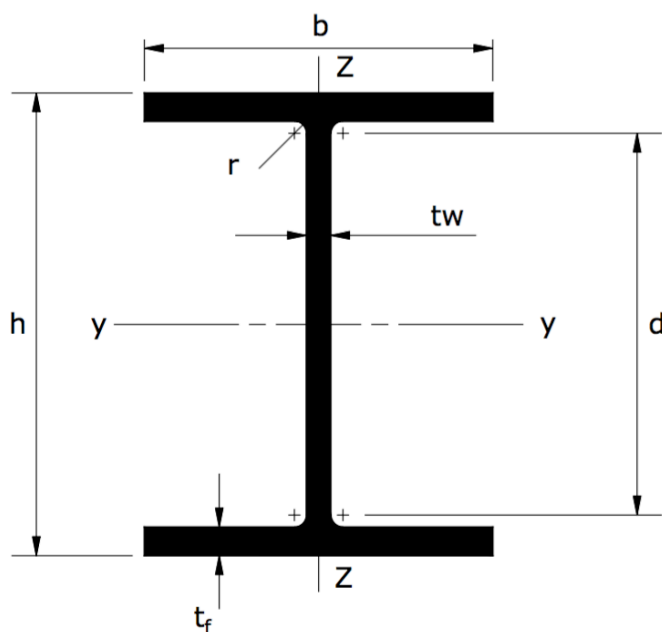
Prije zabijanja potrebno je provjeriti da li su spojevi dobro izvedeni kako bi se gubilo što manje energije. Provjerava se nasjedanje i pravocrtost. Kod loše izvedenog spoja nastaje kut između dva segmenta što dovodi do velikih naprezanja uslijed savijanja prilikom zabijanja.

Spojni piloti najčešće imaju četverokutni poprečni presjek, ali bilo je primjera kada su se izvodili sa heksagonalnim ili trokutnim presjekom. Tipične čvrstoće nalaze se u rasponu od 700 do 2500 kN, sa dimenzijama poprečnim presjeka između  $250 \times 250$  i  $400 \times 400$  mm. Standardna dubina zabijanja u normalnim uvjetima iznosi 30 m (Fleming et al., 2009).

### 3.2.4. Prethodno izrađeni čelični piloti

Prethodno izrađeni čelični piloti mogu se izvoditi u «H» i «I» presjeku, u obliku vijka, i u cjevastom presjeku koji se može napuniti betonom nakon zabijanja. Pojedini inženjeri nisu bili skloni ugradnji čeličnih pilota zbog mogućnosti pojave korozije, ali pokazalo se da u tlu koje ne sadrži onečišćujuće tvari čelik sporo korodira. Prednosti čeličnih pilota su jednostavnost rukovanja, mala vjerojatnost oštećenja prilikom pomicanja i lakoća promjene duljine.

Pogodniji su za zabijanje od betonskih u uvjetima tankih, čvrstih slojeva. Međutim, treba biti oprezan, jer tanji piloti kao što su oni «H» presjeka znaju tijekom zabijanja skrenuti sa zadanog pravca, pogotovo ako su spojevi rađeni varenjem. Piloti tankog «H» presjeka u manjoj mjeri razmiču tlo što je korisno kod projekata s gusto postavljenom mrežom pilota u tlima koja su sklona bubrenju. Primjer pilota takvog presjeka prikazan je na slici 3-1.

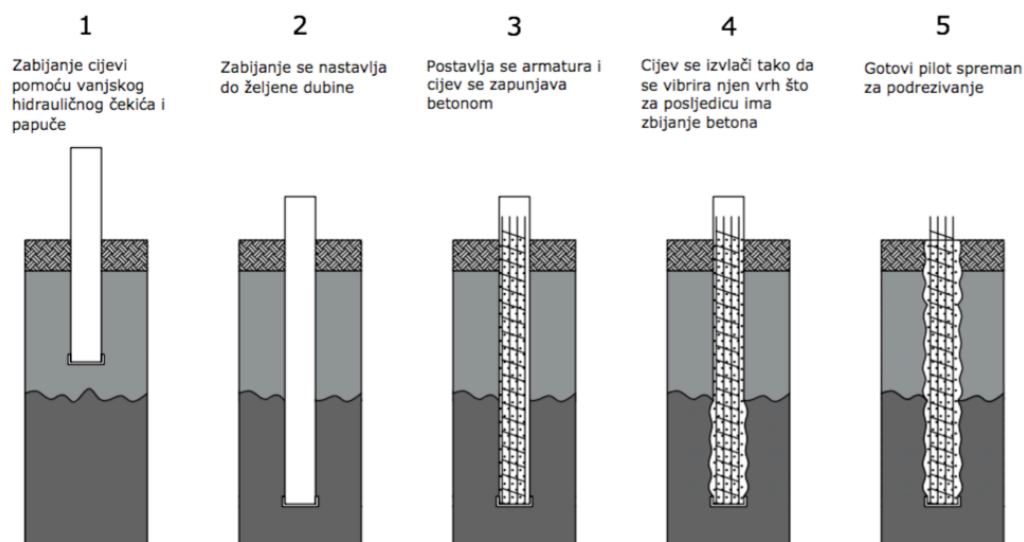


**Slika 3-1** Primjer pilota sa «H» presjekom ( $b$  – širina,  $h$  – visina,  $r$  – radijus zakrivljenosti spoja,  $d$  – duljina štapa,  $t_w$  – širina štapa,  $t_f$  – širina noge)

### 3.2.5. Zabijeni, lijevani, razmičući piloti

Ovaj tip pilota dolazi u dvije vrste. Kod prve zabija se zaštitna kolona, a prilikom njenog vađenja lijeva se beton u nastalu prazninu. Kod druge vrste zaštitna kolona je trajni dio konstrukcije. Prva vrsta može se koristiti samo kod manjih opterećenja, dok druga podnosi velika opterećenja u odgovarajućim geološkim uvjetima.

Piloti tipa «Frenki» su primjer zabijenih, lijevanih pilota, kod kojih se privremena cijev zatvorena s donje strane zabija pomoću vanjskog hidrauličnog čekića kao što je prikazano na slici 3-2. Armatura se ugrađuje prije lijevanja betona. Suvremeni strojevi za izradu ovog tipa pilota su opremljeni uređajima za praćenje penetracije pilota i volumena betona.

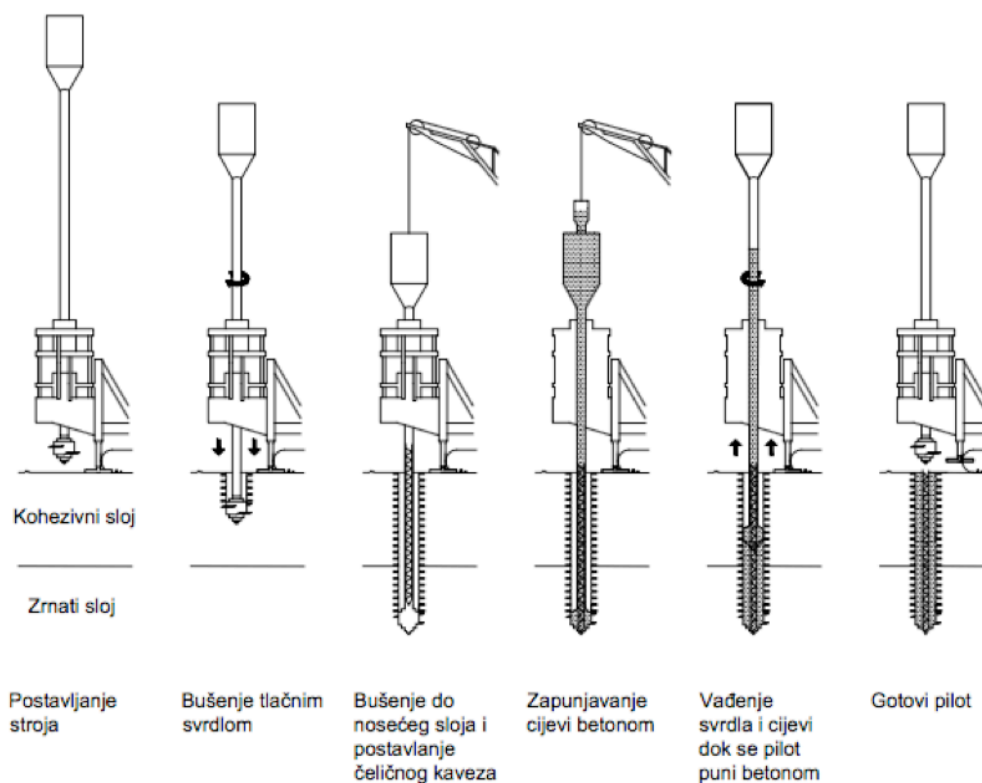


Slika 3-2 Izrada pilota tipa «Frenki»

### 3.2.6. Vijčani, lijevani, razmičući piloti

Ugradnja ovog pilota vrši se pomoću stroja nalik na svrdlo, ali je prateći proces zbijanje, a ne iznošenje materijala, pa se ovi piloti svrstavaju pod razmičuće. Svrdlo se nalazi na šupljaj cijevi preko koje se prenose tlačna sila i okretni moment, a kasnije služi za postavljanje armature i lijevanje betona. Ugradnja ovog tipa pilota prikazana je u koracima na slici 3-2.

Za dane dimenzije pilota i volumen betona, nosivost ovog tipa pilota veća je od nosivosti klasičnih bušenih pilota. U slučaju velikih momenata savijanja mali promjer armature može predstavljati problem. Ovaj sistem predstavlja kombinaciju pozitivnih karakteristika razmičućih pilota sa niskom razinom buke i vibracija koja je karakteristična za bušene pilote. Prednost u smislu zaštite okoliša je što ne nastaje velika količina potencijalno onečišćenog tla koje se mora odvoziti, ali zbog potrebe za velikom snagom koja je potrebna za rad svrdla može doći do većeg onečišćenja atmosfere.



**Slika 3-3** Sistem izrade vijčanih, lijevanih, razmičućih pilota

### 3.3. Metode zabijanja pilota

Metode zabijanja pilota razvrstavaju se u sljedeće kategorije:

1. Padajućim čekićem
2. Eksplozijom
3. Vibracijom
4. Dizanjem.

Sa iznimkom metode dizanjem, zabijanje pilota je vrlo glasan proces. U današnje vrijeme, kada zaštita okoliša postaje sve bitnija, najviše se radi na razvoju utišanih čekića i zavjesa za izolaciju zvuka. Mogućnost korištenja određene metode zabijanja uvelike će ovisiti o dopuštenoj razini buke na tom području.

#### 3.3.1. Padajući čekić

Metoda padajućeg čekića spada u tradicionalne metode ugradnje pilota i dalje se koristi. Objekt mase okvirno mase pilota pusti se da duž vodilica padne na pilot sa određene

visine. Primjer stroja za zabijanje koji objedinjuje funkciju dizanja i vođenja pilota tijekom zabijanja i vođenja čekića tijekom pada prikazan je na slici 3-4.



**Slika 3-4** Junttan PM20LC stroj za zabijanje betonskih, drvenih i čeličnih pilota (Junttan Oy, 2019)

Kod vođenja pilota potrebno je ostvariti ravnotežu između kontroliranog usmjeravanja i slobodnog hoda, pogotovo pri dnu okvira. Tijekom zabijanja dolazi do malih bočnih pomaka i uvijanja pilota. Ako se to spriječi pretjeranom kontrolom usmjeravanja pri dnu okvira može doći do prenaprezanja pilota torzijom ili savijanjem, te oštećenja pilota koje ne mora biti vidljivo na površini. Mali otklon od vertikale i specificirane lokacije za ugradnju se tolerira.

Masa čekića mora iznositi između 0,5 i 2 mase pilota, dok visina pada iznosi 0,2 do 2 m. Ekscentrični udarac čekića o glavu pilota izaziva znatno veća naprezanja. Stoga se preporuča korištenje dugačkih, užih čekića. Veća naprezanja na glavu pilota mogu se očekivati sa povećanjem visine pada nego prilikom korištenja težeg čekića (Fleming et al., 2009).

### 3.3.2. Zabijanje pilota dizel čekićem

Ova metoda moderna je inačica korištenja energije eksplozije za zabijanje pilota. Dizel čekić koristi malj koji se podiže eksplozijom u zatvorenom cilindru. U dizel čekiću s dvostrukom akcijom malj koji putuje prema gore stvara vakuum u zasebnoj, prstenastoj komori. Ovo pomaže u spuštanju malja pa je učinak gotovo dvostruko veći nego kod prvog tipa. Koriste se čekići manje mase od padajućih čekića budući da se efikasnost nadoknađuje brzinom procesa. Kod zabijanja vertikalnih pilota može se postaviti na vrh pilota bez vodicica.

### 3.4. Nerazmičući piloti

Izrada ovih pilota zasniva se na izradi bušotine i njenom zapunjavanju betonom. Tvrdne gline posebno su povoljne za ovu vrstu pilota jer nije potrebno podgrađivanje da se ostvari stabilnost. U nestabilnim tlima, kao što je šljunak, potrebno je provesti privremeno podgrađivanje pomoću okvira, bentonitne suspenzije ili polimerskog fluida. Također se može koristiti okvirna podgrada stalnog karaktera. Metoda lijevanja betona pomoću kontinuiranog svrdla koje se rotira u tlu isto spada pod nerazmičuće. Stoga, tri vrste nerazmičućih pilota su:

1. bušeni, lijevani piloti
2. djelomično predgotovljeni piloti
3. piloti kontinuiranog svrdla.

Pogotovo kod tipova 1. i 2. ne dolazi ni do najmanjeg razmicanja tla, čak može doći do razrahljivanja zrnatog tla. Gube se najčešće pozitivni efekti zbijanja tla. Prednost koja nastaje kod ovog tipa pilota su grube i nepravilne stijenke kao posljedica bušenja zbog kojih nastaje veće trenje između pilota i tla, pa je i nosivost veća.

#### 3.4.1. Bušeni, lijevani piloti

U najvećem broju slučajeva izrađuju se bušotine kružnog presjeka, pa su i ovi piloti toga oblika. Po veličini dijele se na one maloga i velikoga promjera, sa granicom od 600 mm. Najmanji promjeri koji se izrađuju iznose 300 mm, a najveći 2100 mm. U današnje vrijeme piloti malog promjera uglavnom se izrađuju metodom kontinuiranog napretka svrdla, a većeg promjera rotacijskim i ponekad udarnim metodama (Fleming et al., 2009).

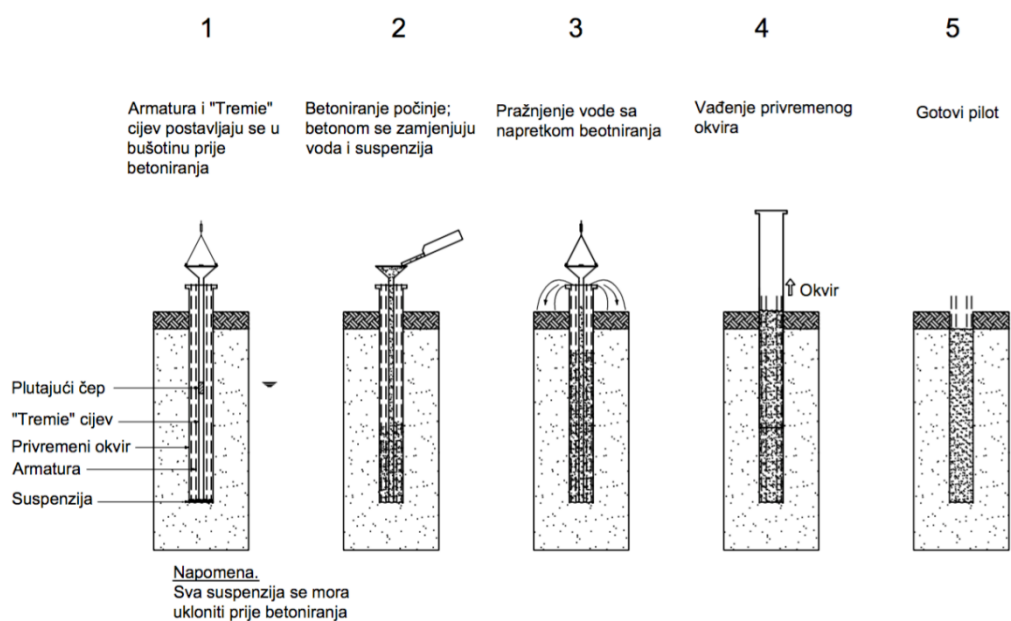
Rotacijsko bušenje postiže se primjenom svrdla koje može biti montirano na gusjenicama ili kamionu. U kombinaciji sa kamionom postiže se veća mobilnost, ali postoje ograničenja u pogledu visine svrdla. Manji strojevi za rotacijsko bušenje često se

proizvode kao objedinjeni, zasebni strojevi, dok veći i dalje koriste standardni krak dizalice sa instaliranim vanjskim pogonom svrdla. Svrdlo može biti opremljeno zubima za kidanje čvršćeg tla.

Gornji dio bušotine uglavnom se nalazi u lošem i slabom tlu pa ga se privremeno podgrađuje. Običaj je koristiti čelični okvir, čak i kad se u ostatku bušotine koristi bentonitna suspenzija ili polimerski fluid. Privremeni okvir također služi za sprječavanje prodora vode kod bušotina u propusnom tlu.

U suhim bušotinama betoniranje je jednostavan proces. Nakon završetka bušotine centralno se postavlja armatura. Tijekom betoniranja izvlači se privremeni okvir, pazeći da se unutar okvira uvijek nalazi glava betona.

Kada vodom zasićeni šljunčani sloj leži na sloju čvrste gline privremeni okvir vodi se kroz šljunčani sloj i zabija u glineni kako bi se šljunčani sloj zaštitio od vode. Kada ovo nije moguće koristi se metoda sa tremie cijevima prikazana na slici 3-5. Važno je paziti da se tremie cijev uvijek nalazi ispod dodira betona i vode tijekom betoniranja.



**Slika 3-5** Lijevanje betona tremie metodom

### 3.4.2. Piloti kontinuiranog svrdla

Ova metoda uglavnom se koristi za izradu pilota manjih promjera, sa maksimalnim promjerom od 1000 do 1200 mm. Prednosti ove metode su ekološkog karaktera: gotovo da ne nastaju vibracije i buka. U propusnim tlima nema potrebe za korištenjem tremie metode



i privremene podgrade. Može se koristiti u pijescima, šljuncima i glinama (Fleming et al., 2009).

Svrđlo je velike duljine i šuplje u sredini. Postavljeno je na gusjenice ili kamion. Motor za pokretanje svrdla nalazi se na vrhu, a svrdlo je usmjeravano vodilicama koje su obješene sa vrha. Primjer takvoga stroja prikazan je na slici 3-6.



**Slika 3-6** Stroj za izradu pilota s kontinuiranim svrdlom Geax EK90 (Piling Equipment Ltd., 2018)

Piloti se izrađuju rotacijom kontinuiranog svrdla u tlu do željene dubine. Tijekom te faze šupljina u sredini svrdla zatvorena je čepom. Na željenoj dubini kroz šupljina se lijeva beton pod pritiskom koji izbacuje čep. Svrđlo se rotacijom vadi iz tla, a paralelno s tim se bušotina kroz središnju šuljinu zapunjava betonom. U beton se prije stvrdnjavanja stavlja armatura. Kod pilota veće dužine umetanje armature se pospješuje vibratorom.

### 3.5. Mikropiloti

Pojam mikropiloti najčešće se koristi za pilote promjera manjeg od 250 mm. U BS EN14199 (BSI, 2005) mikropiloti su definirani maksimalnim promjerom od 300 mm za bušene pilote i maksimalnim promjerom od 150 mm za zabijene pilote. Koriste se za temeljenje obiteljskih kuća i drugih manjih građevina kod kojih bi slijeganje bilo preveliko ako bi se koristili plitki temelji.

Mikropiloti se također koriste u svrhu ojačanja i podupiranja tla:

1. Da bi se stvorio pojačani blok tla,
2. Za stabilizaciju kosina,
3. Kao zid od mikropilota,
4. Za ojačanje postojećih potpornih struktura.

Kao i kod običnih pilota, metode izrade mogu biti razmičuće i nerazmičuće. Kod nerazmičućih metoda prevladavaju bušeni, lijevani mikropiloti. Tražena karakteristika strojeva za izradu mikropilota je prilagodljivost jer se često koriste u različitim uvjetima, za različite namjene. Druga metoda koja se koristi je injektiranje, kod koje dolazi do mješanja in-situ tla i injektirane cementne smjese. Budući da se mikropiloti izrađeni na ovaj način mogu preklapati, ova metoda se često koristi za izradu vodonepropusnog zida.

Jedna od metoda ugradnje razmičućih mikropilota je metoda utiskivanja. Cijev malog promjera ili predgotovljeni segment pilota se utiskuje u tlo gotovo bez vibracija i buke, koristeći se težinom strukture za podupiranje. Druga metoda koristi unutrašnji udarni čekić kojim se u tlo zabijaju čelične cijevi sa tankim stijenkama. Ovisno o uvjetima cijevi se mogu, ali i ne moraju zapunjavati betonom.

## 4. PROJEKTIRANJE PILOTA

Presudnu ulogu u odabiru tipa i dimenzija pilota igrati će praktični i ekonomski faktori. Za svakog razmatranog pilota potrebno je provesti analizu kako bi se zaključilo da li će na zadovoljavajući način ispuniti svoju funkciju elementa temeljenja. Ta analiza najčešće uključuje proračun nosivosti i procjenu ostalih potencijalnih problema.

### 4.1. Aksijalna nosivost pilota

Pilot na kojeg je opterećenje nanoseno paralelno s njegovom osi nosit će to opterećenje djelom na trenje duž plašta, djelom preko normalnog naprezanja na bazi pilota, kao što je prikazano na slici 4-1. Fleming et al. (2009) navodi da je nosivost pilota  $Q$  pod aksijalnim opterećenjem jednaka zbroju nosivosti baze  $Q_b$  i nosivosti plašta  $Q_s$ . Stoga,

$$Q = Q_b + Q_s = A_b q_b + A_s \bar{\tau}_s \quad (4-1)$$

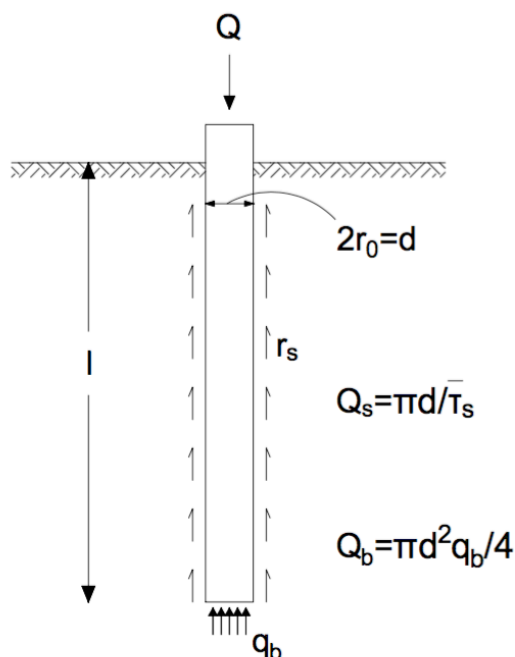
gdje su:  $A_b$  – površina baze pilota,

$q_b$  – naprezanje na bazu pilota,

$A_s$  – površina plašta,

$\bar{\tau}_s$  – prosječno ograničavajuće posmično naprezanje plašta

$r_s$  – naprezanje na plašt pilota.



Slika 4-1 Aksijalno opterećen pilot

Piloti koji prolaze kroz mekši sloj, a baza im počiva na tvrdem sloju ostvaruju većinu nosivosti iz nosivosti baze  $Q_b$ . Ako se tvrdi sloj nalazi na prevelikoj dubini ili ga nema tada se primjenjuju piloti čija nosivost se zasniva na trenju između plašta i okolnog tla. U sitnozrnatim tlima do izražaja dolazi nosivost plašta, a u krupnozrnatim nosivost se raspoređuje duž plašta i baze pilota.

Nosivost plašta aktivira se pri puno manjim pomacima pilota nego nosivost baze. Ovu razliku važno je uzeti u obzir pri predviđanju slijeganja pilota i raspodjele naprezanja između baze i plašta, u stvarnim uvjetima nakon ugradnje. Ista nosivost može se postići nizom kombinacija promjera i duljine pilota, pa je prije konačnog odabira potrebno razmotriti karakteristike slijeganja pilota i ekonomske faktore ugradnje pilota određenih dimenzija. Duži i tanji piloti pokazali su se efikasnijima i po pitanju nosivosti po volumenu i po pitanju čvrstoće pilota (Randolph, 1983).

Procjena nosivosti pilota i dalje se većim djelom zasniva na empirijskim metodama, izvedenim iz korelacija mjerene nosivosti pilota i podataka o tlu promjenjive kvalitete. Postoji veliko rasipanje u korelacijama, neki pristupi bolje odgovaraju određenim tipovima tla, unatoč tome i tada se moraju očekivati velike granice pogreške. Dodatni problem je što se mnoga tla ne mogu jednostavno svrstati u određenu kategoriju kao što je sitnozrnato, krupnozrnato tlo ili stijena. Na projektiranje pilota treba se gledati kao na kompromis, birajući odgovarajuću metodu s obzirom na tip tla i uvjete tog područja.

#### 4.1.1. Nosivost u krupnozrnatim tlima

Dokazano je od strane Vesic (1977) da naprezanje na bazu pilota ima granicu nakon koje ne raste unatoč povećanju dubine. Ovo je dovelo do ograničavanja vrijednosti naprezanja na bazu pilota, gdje se ono određivalo s obzirom na gustoću i tip tla. Moderni pristupi projektiranju pilota napustili su ovu praksu, ali prihvaćaju da će u homogenom sloju pijeska postojati postepeno smanjujući gradijent projektiranog naprezanja na bazu pilota. Ovome doprinose dva efekta: kut trenja  $\Phi'$  smanjuje se s povećanjem bočnog tlaka (Bolton, 1986) i indeks krutosti smanjuje se sa povećanjem naprezanja.

Statički penetracijski pokus omogućava preciznije određivanje vrijednosti naprezanja na bazu pilota, zbog očite sličnosti između konusa i aksijalno opterećenog pilota. Potrebno je napraviti popravke rezultata zbog razlike u veličini i manjih pomaka kod pilota nego u pokusu.

Trenje plašta  $\bar{\tau}_s$  za pilote u krupnozrnatim tlima računa se pomoću sljedećeg izraza

$$\bar{\tau}_s = \sigma'_n \tan \delta = K \sigma'_v \tan \delta \quad (4-2)$$

gdje je  $\sigma'_n$  normalno efektivno naprezanje na plašt pilota nakon ugradnje, a  $\delta$  je kut trenja između pilota i tla (Fleming et al., 2009).

#### 4.1.2. Nosivost u sitnozrnatim tlima

Drenirana, nosivost vrha pilota u glini promatrana kroz duži vremenski period, mnogo je veća od nosivosti u nedreniranom stanju. Međutim, slijeganja potrebna da bi se ona aktivirala prevelika su za većinu građevina. Stoga, obično se nosivost vrha pilota u glini računa s obzirom na nedreniranu posmičnu čvrstoću gline  $c_u$  i faktor nosivosti  $N_c$ :

$$q_b = N_c c_u \quad (4-3)$$

gdje je  $q_b$  naprezanje na bazu pilota.

Većina pilota u glinama ostvaruje svoju nosivost većim djelom preko nosivosti plašta. Dok je recimo kod pilota u pijesku omjer nosivosti između vrha i plašta otprilike 50 kroz 100, kod pilota u glini on iznosi 10 kroz 20. Zato se uložilo u razvoj pouzdanih metoda za procjenu nosivosti plašta za pilote u glinama. Dvije najkorištenije su: metoda ukupnih naprezanja i metoda efektivnih naprezanja (Fleming et al., 2009).

#### 4.1.3. Dinamička analiza zabijanja pilota

Cilj dinamičke analize zabijanja pilota je detaljnija procjena karakteristika zabijanja. Inercijski efekti tla oko pilota i viskozna priroda tla mogu se uzeti u obzir korištenjem odgovarajućih numeričkih metoda, kao što je metoda konačnih elemenata (Smith i Chow, 1982). U jednodimenzionalnom modelu tlo se pojednostavljuje kao sredina bez mase koja pruža otpor bez trenja, a pilot se modelira kao diskretni skup elemenata s masom, međupovezanih oprugama.

U sklopu projektiranja glavni zadatak dinamičke analize je procijeniti mogućnost zabijanja u danim geološkim uvjetima, obzirom na tip i veličinu čekića. Izlazni podatak koji se dobiva ovakvom analizom je skup krivulja koje prikazuju stopu penetracije kao funkciju pretpostavljene «statičke» otpornosti pilota. One se koriste za odabir odgovarajućeg čekića, procjenu vremena i troška ugradnje svakog pilota i pružaju kontrolu kvalitete ugradnje pilota.

## 5. DINAMIČKO TESTIRANJE PILOTA

Korištenje dinamičkih metoda testiranja za procjenu nosivosti pilota vrlo je rašireno. Preciznost ovih metoda značajno se povećala sa napretkom tehnologije i sistema za brzo prikupljanje podataka koji omogućavaju mjerenje dinamičke sile i brzine valova u pilotu tijekom zabijanja.

### 5.1. Analiza valne jednadžbe

Kretanje energije zabijanja duž pilota, uzimajući u obzir interakciju sa okolnim tlom, može se analizirati uz dostatnu točnost koristeći jednodimenzionalnu idealizaciju. U ovoj idealizaciji promatra se samo vertikalni (aksijalni) pomak pilota, i to je prikazano sljedećom diferencijalnom jednadžbom (Fleming et al., 2009):

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{f}{(AE)_p} \quad (5-1)$$

gdje je:  $(AE)_p$  krutost poprečnog presjeka pilota,

$c$  brzina prolaska vala kroz pilot,

$w$  vertikalni pomak pilota,

$z$  udaljenost duž pilota,

$t$  varijabla vremena,

$f$  aktivirana otpornost tla po jedinici dužine pilota.

U prošlosti ova se jednadžba rješavala koristeći se tehnikama konačnih razlika ili konačnih elemenata, u kojima se pilot modelirao kao diskretni skup točaka s masom, međupovezanih oprugama. Ovaj model poslužio je kao osnova za nastanak mnogobrojnih kompjuterskih programa čiji je zadatak procjena mogućnosti zabijanja pilota.

Jednadžba (5-1) može se numerički riješiti na sljedeći način:

$$w = g(z - ct) + h(x + ct) \quad (5-2)$$

gdje su  $g$  i  $h$  neodređene funkcije koje predstavljaju valove koji putuju prema dolje ili prema gore. Ako se pomak prema dolje i tlačno naprezanje uzmu kao pozitivni, onda su sila  $F$  i brzina čestice  $v$  u pilotu dani sa:

$$F = -(AE)_p \frac{\partial w}{\partial z} = -(AE)_p (g' + h') \quad (5-3)$$

$$v = \frac{\partial w}{\partial t} = -c(g' + h') \quad (5-4)$$

gdje ova notacija označava derivaciju funkcije obzirom na varijable.

Za brzinu i silu može se smatrati da se sastoje od dvije komponente, jedna uslijed vala koji putuje prema dolje (predstavljena funkcijom  $g$ ) i jedna uslijed vala koji putuje prema

gore (predstavljena funkcijom  $h$ ). Koristeći indekse  $d$  i  $u$  za te dvije komponente brzina se izražava kao:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_d + \mathbf{v}_u = -c\mathbf{g}' + c\mathbf{h}' \quad (5-5)$$

Sila  $\mathbf{F}$  se slično izražava:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_a = -(AE)_p\mathbf{g}' - (AE)_p\mathbf{h}' = \mathbf{Z}(\mathbf{v}_d + \mathbf{v}_u) \quad (5-6)$$

gdje je  $\mathbf{Z} = (AE)_p/c$  i označava impendanciju pilota.

Ovim odnosima može se modelirati prolaz valova uz i niz pilote različitih poprečnih presjeka, dozvoljavajući interakciju sa okolnim tlom. Pomaže zamisliti pilot kao da se sastoji od elemenata duljine  $\Delta z$ , gdje otpor tla djeluje u čvorovima koji se nalaze na sredini svakog elementa. Numerička implementacija karakterističnih rješenja uključuje praćenje prolaza uzlaznih i silaznih valova od jednog dodira elementa do drugog. Vremenski inkrement  $\Delta t$  bira se takav da svaki val putuje duž jednog elementa u jednom vremenskom inkrementu ( $\Delta t = \Delta z/c$ ) (Fleming et al., 2009).

Između čvorova  $i$  i  $i+1$  otpor tla može se uzeti kao  $T_i$ , čija vrijednost ovisi o razmicanju tla i brzini. Uzimajući  $T_i$  kao pozitivnu vrijednost kada djeluje tako da se tlo opire kretanju pilota prema dole, otpor tla će dovesti do ulaznih i silaznih valova veličine:

$$\Delta F_u = -\Delta F_d = T_i/2 \quad (5-7)$$

Ovi valovi dovesti će do promjene valova koji putuju duž pilota.

Uzimajući u obzir uzlazne i silazne valove na čvorovima  $i$  i  $i+1$ , u vremenu  $t$ , novi silazni val u čvoru  $i$  u vremenu  $t+\Delta t$  dan je sa:

$$(v_d)_i[t + \Delta t] = (v_d)_{i-1}[t] - T_{i-1}[t + \Delta t]/(2Z) \quad (5-8)$$

dok je novi uzlazni val koji je dijelom iznad čvor  $i$  dan sa:

$$(v_u)_i[t + \Delta t] = (v_u)_{i-1}[t] - T_{i-1}[t + \Delta t]/(2Z) \quad (5-9)$$

Silazni val reflektirati će se od vrha pilota. Veličina reflektiranog vala ovisit će o otporu vrha  $Q_b$ . Aksijalna sila u pilotu mora uravnotežiti otpor vrha pilota, što dovodi do izraza za brzinu reflektiranog (uzlaznog) vala:

$$(v_u)_n[t + \Delta t] = (v_u)_n[t + \Delta t] - Q_b[t + \Delta t]/Z \quad (5-10)$$

Brzina vrha ( $n$ -ti čvor) je:

$$v_n = 2v_u + Q_b/Z = 2v_d - Q_b/Z \quad (5-11)$$

gdje se sve količine odnose na vrijeme  $t+\Delta t$ .

Za silu  $F_d$  koja stiže na glavu pilota izraz (9-10) implicira reflektiranu silu od:

$$F_u = -Zv_u = Q_b - F_d \quad (5-12)$$

Veličina reflektiranog vala nalazi se u rasponu od  $-F_d$ , gdje je otpor glave jednak nuli, do  $F_d$ , gdje je brzina vrha jednaka nuli i otpor vrha je dvostruko veći od upadne sile (vidi izraz (5-12)).

Treba napomenuti da se rješenja valne jednadžbe mogu koristiti za modeliranje čekića, kao i za modeliranje pilota. Geometrija i masena gustoća svake komponente (malj, jastuk, nakovanj) se određuju i malju se zadaje početna brzina kako bi se modelirao udarac (Fleming et al., 2009).

## **5.2. Podaci o dinamičkom naprezanju valova**

Analiza valne jednadžbe koristi se za utvrđivanje mogućnosti zabijanja pilota. Potencijalno važnija primjena leži u interpretaciji podataka o dinamičkom naprezanju valova koji se dobivaju tijekom zabijanja. Ti podaci tvore osnovu za dinamičko testiranje pilota koje može otkloniti potrebu za provođenjem skupljeg statičkog testa.

Mjerenje tih podataka postiže se korištenjem lakih ćelija naprezanja i akcelometara koji su pričvršćeni na pilot malo ispod čekića.

Prva faza interpretacije podataka vrši se na terenu. Podaci o naprezanju i akceleraciji se obrađuju kako bi se dobili podaci o sili i brzini. Iz tih podataka mogu se izvesti različiti parametri. Jedan od njih je maksimalna energija prenesena na pilot, te se tako može ocijeniti čekić obzirom na iskorištenje energije.

Kod tradicionalnih formula za proračun zabijanja pilota najveći izvor grešaka procjene ukupne nosivosti pilota proizlazi iz nesigurnosti u energiju koja se prenosi na pilot. Izravno mjerenje te energije omogućava korištenje jednostavnih formula za proračun zabijanja velike točnosti.



## 6. DINAMIČKO TESTIRANJE PILOTA – PRIMJER

U pitanju je projekt izgradnje smještajne građevine u Zagrebu, na k.č.br. 2993, k.o. Črnomerec, u Ilici. Buduća građevina je kvadratnog tlocrta, s tlocrtnim dimenzijama cca. 18,7 x 18,7 m, katnosti prizemlje + 15 katova. Konstrukcija je armiranobetonska. Analize nosivosti i slijeganja buduće građevine pokazale su nedostatnu nosivost i prekomjerna slijeganja temeljnog tla za slučaj temeljenja na temeljnoj ploči, te je zaključeno da je potrebno duboko temeljenje (Matković, 2017).

Radovi na izvedbi pilota obavljeni su prema normi HRN EN 1536:2008; Izvedba posebnih geotehničkih radova – Bušeni piloti. Probni pilot je armiran uzdužnom armaturom B500B 8Φ32 mm i spiralnom armaturom B500B Φ12 mm, hod spirale 20 cm, 10 cm i 8 cm u zoni nanošenja sile (nadzemni dio). Beton pilota je razreda C 40/50,  $d_{\max} = 16$  mm, minimalna količina cementa 400 kg/m<sup>3</sup>, razred konzistencije S-4 (Matković, 2017).

Izvođeni su istom tehnologijom kao i piloti za smještajnu građevinu. Izvedba pilota sastoji se od bušenja, ugradnje armature i betoniranja pomoću kontraktora. Bušenje je izvedeno pomoću zaštitnih kolona vanjskog promjera 60 cm do projektirane kote stope probnog pilota odnosno pomoću zaštitnih kolona vanjskog promjera 150 cm za vlačne pilote. Duljina pilota u tlu iznosi 23,0 m za probni/tlačni pilot. Tijekom izvedbe pilota nisu registrirane pojave koje bi rezultirale smanjenim nosivostima pilota (izdizanje armaturnog koša tijekom betoniranja i sl.) (Matković, 2017).

### 6.1. Ispitivanje nosivosti pilota dinamičkim postupkom

Ispitani pilot je armiranobetonski, promjera 150 cm i duljine 23 m, prikazan je na slici 6-1.

Za testiranje i aktiviranje granične nosivosti pilota korišten je uteg sa slobodnim padom mase oko 12000 kg. Minimalna visina pada utega je 0,25 m, a maksimalna 3 metra.

Korištena su dva mjerača akceleracije i četiri mjerača deformacije. Postavljeni su osno simetrično, oko 1,50 m pod glavom pilota, paralelno osi pilota (slika 6-2). Postupak mjerenja se odvija na sljedeći način: udarac čekića izaziva tlačni val koji putuje duž pilota i reflektira se od dna i vraća nazad. Val se detektira pomoću senzora. Digitalizirani podaci prenose se u PDA uređaj, na način da se za svaki udarac dobiva prikaz promjene sile i brzine pomaka u ovisnosti o vremenu. Svi se podaci pohranjuju kako bi ih se moglo naknadno, posebno analizirati. Metoda i postupak mjerenja su u skladu sa standardom ASTM D 4945, i definirani po preporuci njemačkog udruženja geotehničara.



**Slika 6-1** Ispitivanje probnog pilota promjera 150 cm (Matković, 2017)

Po izvedbi ispitivanja dinamičkim opterećenjem, dobiveni analogni podaci sile i pomaka se digitaliziraju za računalnu analizu na IBM-PC računalu s programom CAPWAP 2006 (Case Pile Wave Analysis Program, Pile Dynamics inc, USA), čija je osnova valna jednačina. Model pilota i tla predstavlja se jednom od mjerenih krivulja, pa se metodom iteracija traži najbolje preklapanje mjerene i izračunate krivulje, kako bi se saznala svojstva modela tla i granična nosivost ispitivanog pilota (Matković 2017).

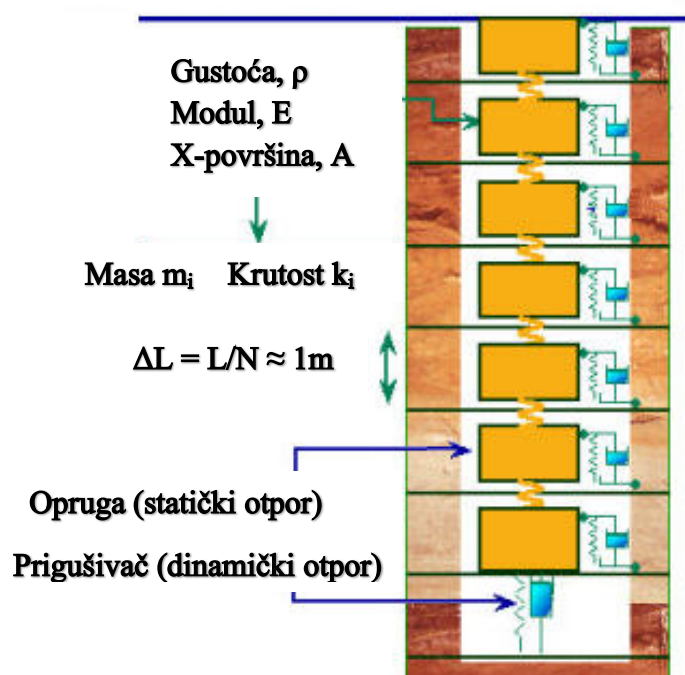


**Slika 6-2** Glava pilota s utegom i ugrađenim senzorima (Matković, 2017)

Analiza valne jednadžbe nastala je iz rada E. A. Smitha koji je proučavao širenje valova u tankim šipkama i razvio numeričke metode analize za predviđanje nosivosti u ovisnosti o broju udaraca. Model prikazan na slici 6-3 matematički predstavlja čekić i sve njegove dodatke. Tlo je predstavljeno kao niz sjedinjenih masa i opruga. Za svaki segment pilota reakcija tla se modelira kao viskoelastično-plastična. Ova metoda je najbolja za predviđanje odnosa nosivosti pilota i broja udaraca te jedina metoda kojom se može predviđati naprezanja koja se javljaju tijekom zabijanja. Ograničenja metode leže u nesigurnosti kvantifikacije nekih ulaznih podataka kao što su stvarni učinak čekića i svojstva tla.

Prilikom ispitivanja granične nosivosti pilota dinamičkim postupkom snimljeno je više udaraca od kojih je odabran jedan na kojem je provedena analiza. Trajni pomaci pilota nakon svakog udarca mjereni su geodetskim nivelirom. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 6-1.

### Model pilota i tla



Slika 6-3 Model pilota i tla u sklopu analize valne jednadžbe (Pile Dynamics inc., 2019)

Tablica 6-1 Rezultati ispitivanja nosivosti pilota dinamičkim postupkom (Matković, 2017)

Oznaka pilota	Datum ispitivanja	Udarac br.	Visina slobodnog pada (m)	Permanentni pomak po udarcu (mm)
P1	1.6.2017.	1	2,50	2,50

Maksimalni pomak vrha pilota iznosi oko 13 mm, a dna pilota 11 mm (Matković, 2017).

Prikaz interpretirane ukupne granične nosivosti  $R_u$  ispitanog pilota dan je u tablici 6-2.

Tablica 6-2 Prikaz interpretirane ukupne granične nosivosti ispitanog pilota (Matković, 2017)

Oznaka pilota	Duljina pilota (m)	Nosivost po plaštu (kN)	Nosivost na bazi (kN)	Ukupna nosivost (kN)
P1	23	8998	2392,5	11390,5

## 7. MODEL DINAMIČKOG TESTIRANJA PILOTA

Izrađen je model tla i pilota u programu Plaxis. Simulirano je dinamičko opterećenje koje svojstvima odgovara dinamičkom opterećenju opisanom u prethodnom poglavlju s ciljem usporedbe rezultata modeliranog i stvarnog dinamičkog testiranja pilota. Korišten je osnosimetrični model, sa elementima sa 15 čvorova.

### 7.1. Model tla i proračun

U tablici 7-1 prikazane su karakteristike materijala korištene za izradu modela tla. Podaci o gustoći suhog uzorka tla i gustoći prirodno vlažnog uzorka tla uzeti su iz geotehničkog elaborata. Za neke od slojeva testiranjem je određena jednoaksijalna čvrstoća.

**Tablica 7-1** Karakteristike materijala korištene za izradu modela tla (Mateković, 2015)

Parametar	Ime	1 CI/CH	2 CI	3 CH	4 CL	5 GW/GF <sub>s</sub>	6 CI	7 CH	8 CI/CH	Pilot
Model materijala	Model	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	LE
Tip ponašanja	Tip	UD	UD	UD	UD	D	UD	UD	UD	NP
Gustoća										
suhog uzorka (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{\text{unsat}}$	14,0	12,9	13,7	14,0	17,0	17,6	17,3	16,9	24,0
Gustoća vlažnog uzorka (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{\text{sat}}$	18,4	18,0	18,9	18,9	20,0	21,1	21,1	20,6	24,0
Youngov modul elastičnosti (kN/m <sup>2</sup> )	E	4500	4500	5400	6390	25000	8820	8820	8820	30E6
Edometarski modul (kN/m <sup>2</sup> )	E <sub>oed</sub>	5000	5000	6000	7100	30000	9800	9800	9800	30,6E6
Poissonov koeficijent	$\nu$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25	0,2	0,2	0,2	0,1
Kut trenja (°)	$\varphi$	-	-	-	-	35	-	-	-	-
Nedrenirana posmična čvrstoća (kN/m <sup>2</sup> )	S <sub>u,ref</sub>	10	10	6	22,5	-	123	123	123	-
Rayleighev koeficijent prigušenja	$\alpha$	0,13	0,13	0,13	0,17	0,17	0,21	0,21	0,21	0,21

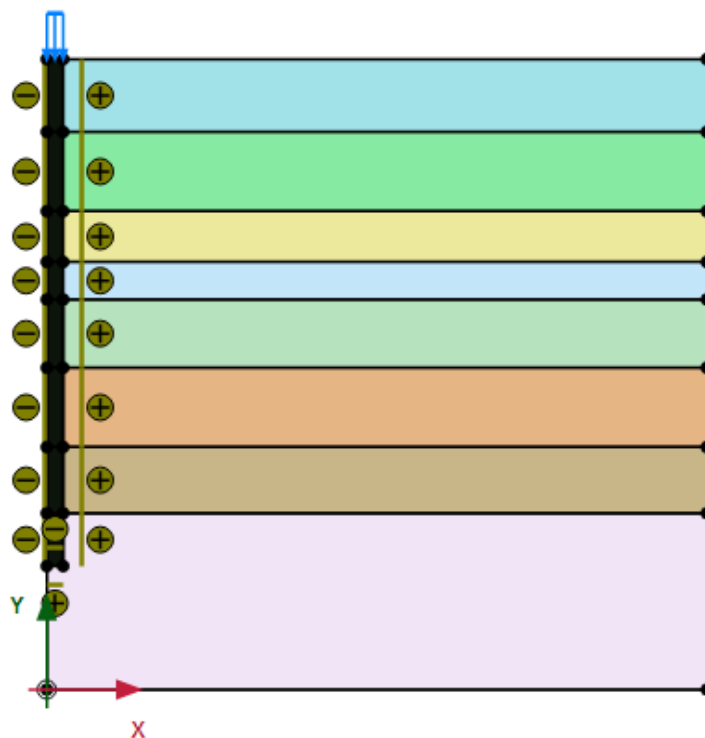
Na temelju odnosa N-broja udaraca i jednoaksijalne čvrstoće  $q_u$  za poznate slojeve, određena je jednoaksijalna čvrstoća  $q_u$  za ostale slojeve, iz koje je potom izračunata nedrenirana posmična čvrstoća  $s_{u,ref}$  pomoću izraza:

$$s_{u,ref} = \frac{q_u}{2} \quad (7-1)$$

Podaci o edometarskom modulu uzeti su iz geotehničkog elaborata, osim u slučaju pilota gdje je pretpostavljen Youngov modul elastičnosti. Program je sam izračunao Youngov modul elastičnosti na temelju edometarskog modula i obratno. Podaci o Poissonovom koeficijentu uzeti su iz literature. Tla su u tablici navedena redom od površine prema dnu. Kratice u tablici su kako slijedi: MC – Mohr-Coulombov model; LE – linearno-elastični model; UD – undrained (nedrenirano stanje); NP – non-porous (neporozno stanje); D – drained (drenirano stanje).

U tablici 7-2 nalaze se ostali podaci o slojevima tla izvađeni iz geotehničkog elaborata koji nisu direktno unošeni u Plaxis, ali su korišteni u stvaranju modela.

Iz danih podataka napravljen je model tla i ugrađenog pilota prikazan na slici 7-1. Model je napravljen s obzirom na podatke dobivene iz 30 m duboke istražne bušotine prezentirane u geotehničkom elaboratu. Prije ugradnje pilota skinuto je 1,4 m nasipa pa dubina modela iznosi 28,6 m, a širina 30,0 m.

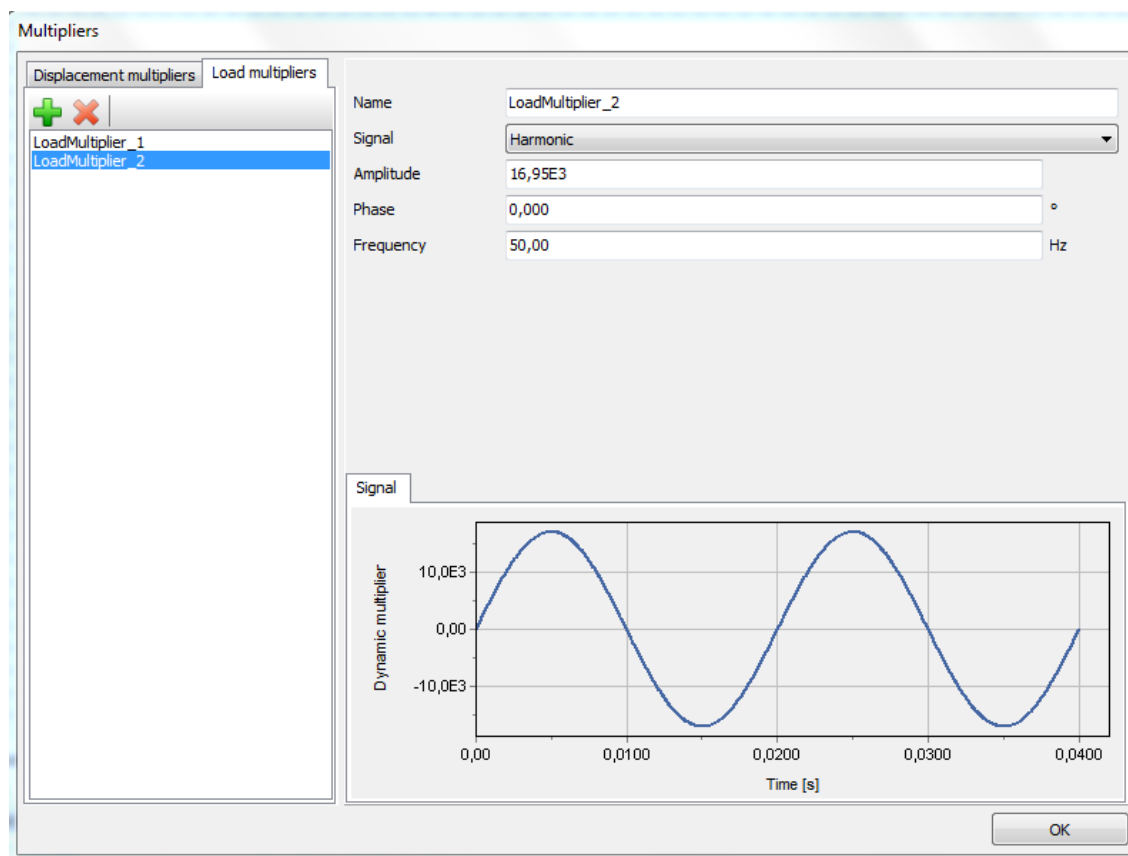


Slika 7-1 Model tla sa pilotom

**Tablica 7-2** Ostale karakteristike slojeva tla iz modela (Mateković, 2015)

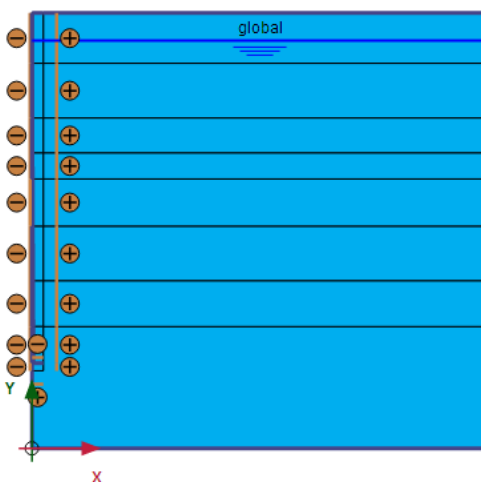
Parametar	1 CI/CH	2 CI	3 CH	4 CL	5 GW/GF <sub>s</sub>	6 CI	7 CH	8 CI/CH
Granulometrijski sastav	Glina s <10% sitnog pijeska	Glina pjeskovita	Glina s 10- 15% pijeska i šljunka	Glina prašnasta	Šljunak dobro graduira n	Glina prašnasta	Glina <10% valutica šljunka	Glina s <5% proslojci šljunka
N <sub>SPT</sub>	11-13	12	10	18	66	65	66-71	64-75
Zbijenost	Teško- gnječiva	Lako- gnječiva	Teško- gnječiva	Lako- srednje- gnječiva	Dobro zbijen	Polu- čvrsta	Polu- čvrsta	Polu- čvrsta do čvrsta
Prirodna vlažnost $w_0$ (%)	31,1- 31,9	39,0	38,3	34,8	-	17,9- 23,1	22,3	20,0-26,0
Granica tečenja $w_L$ (%)	40,4- 50,0	46,3	50,6	20,4-34,9	-	37,9- 44,4	55,4	44,0-52,5
Granica plastičnosti $w_p$ (%)	21,2- 23,9	22,9	23,7	14,2-21,3	-	18,1- 18,7	22,2	23,3-27,2
Indeks plastičnosti $I_p$ (%)	19,2- 26,1	23,4	26,9	6,2-13,7	-	19,2- 26,3	33,2	19,9-29,3
Indeks konzistencije $I_c$ (%)	0,44- 0,72	0,31	0,46	-	-	0,77- 1,01	1,0	0,90-1,30
Boja	Smeđa	Smeđa	Smeđa	Siva do smedesiva	Siv	Smeđa, Sivi proslojci	Siva do smedesi va	Smeđa do smedesiva

Na dodiru tla i pilota stavljen je interface. Za modeliranje dinamičkog opterećenja korištena je naredba distributed line load te je ono definirano kao dinamičko. Potom je pod load multipliers dodan multiplier tipa harmonic, prikazan na slici 7-2, kojim je simuliran udarac bata.



**Slika 7-2** Simulacija dinamičkog opterećenja udarca bata pomoću harmonic multiplera

Za vrijeme terenskih istražnih radova u bušotini registrirana je pojava podzemne vode na koti 3,70 m od ušća bušotine, a nivo podzemne vode se ustabilio na koti 3,20 m od ušća bušotine (Mateković, 2015). Stoga je zadana razina podzemne vode na dubini od 3,20 m, kao što je prikazano na slici 7-3.



**Slika 7-3** Uvjeti podzemne vode na modelu



Proces modeliranja dinamičkog ispitivanja proveden je u četiri faze. Inicijalna faza za proračun koristi K0 proceduru, prva faza koristi plastični tip proračuna, dok sljedeće dvije faze koriste dinamički tip proračuna. U inicijalnoj fazi aktivirano je samo tlo, a u prvoj fazi aktivira se pilot i pripadajući interface. U drugoj fazi aktivira se dinamičko opterećenje, koje se potom deaktivira u trećoj fazi. Glavni podaci korišteni pri zadavanju faza prikazani su u tablici 7-3. Dinamički vremenski interval faze 2 namješten je tako da se poklapa sa jednim udarcem modeliranim pomoću harmonic multiplera frekvencije 50Hz (slika 7-2). Tijekom podešavanja faza potrebno je zadati tip rubnih uvjeta. Na ovom modelu zadana je viskozna granica na desnom i donjem rubu modela.

**Tablica 7-3** Parametri korišteni u zadavanju faza

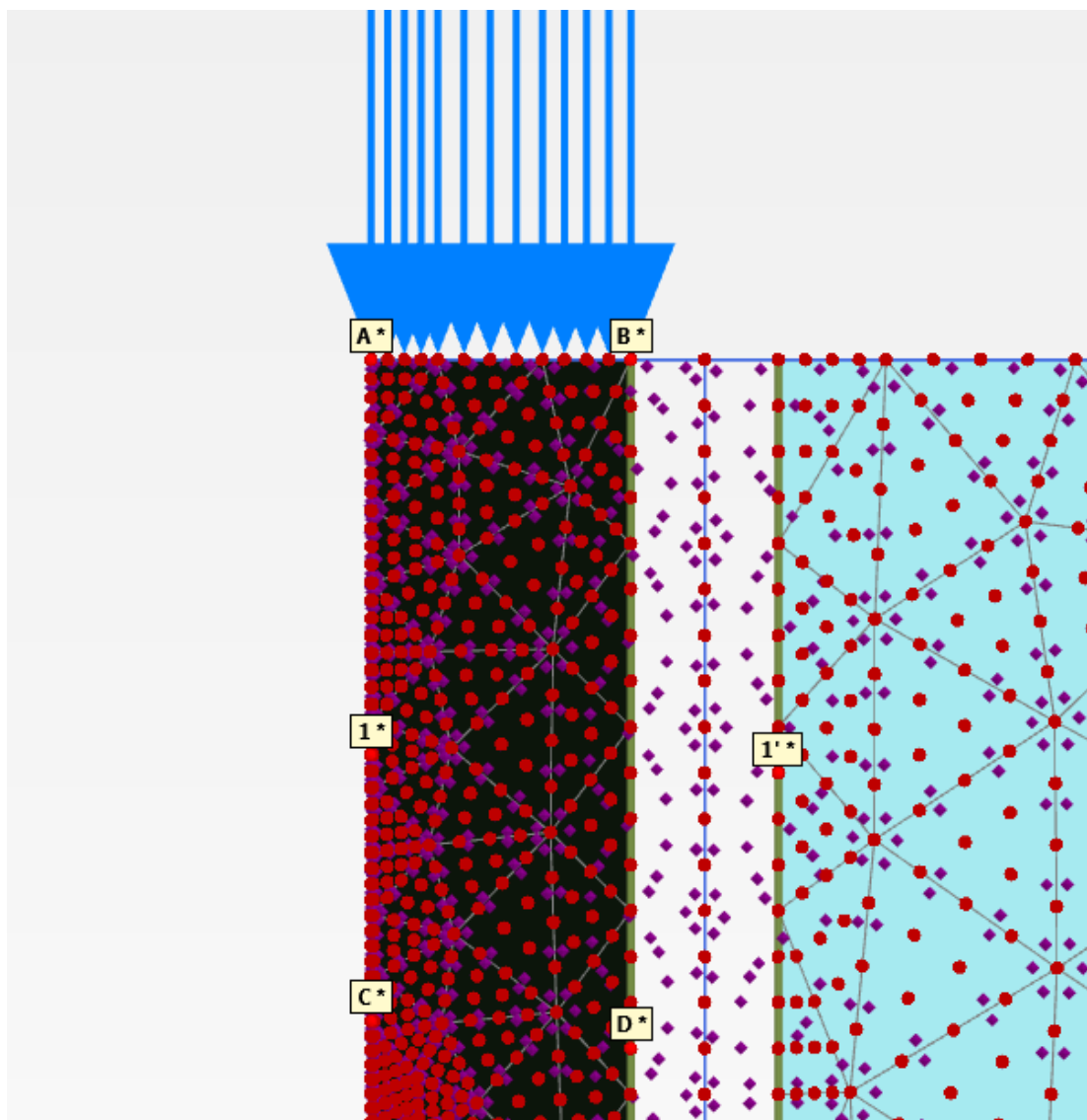
Faza	Inicijalna	1	2	3
Tip proračuna	K0 procedura	Plastični	Dinamički	Dinamički
Dinamički vremenski interval (s)	-	-	0,01	0,19
Opcija „Reset displacement to 0“	-	-	+	-

Postavljanjem interfacea omogućava se relativni pomak između tla i nekog elementa. U slučaju ovog projekta primjenom interfacea omogućen je relativni pomak između pilota i okolnog tla. Svojstvo tla koje definira taj oblik ponašanja naziva se koeficijent adhezije  $\alpha$ , ali u sklopu Plaxisa koristi se naziv  $R_{inter}$ . U tablici 7-4 navedene su vrijednosti koeficijenta  $R_{inter}$  za tla ovoga modela određena na temelju opisa konzistencije navedenih u geotehničkom elaboratu i empirijskih vrijednosti koeficijenta adhezije.

**Tablica 7-4** Vrijednosti koeficijenta  $R_{inter}$  (Fine Spol s.r.o., 2019)

Tlo	1 CI/CH	2 CI	3 CH	4 CL	5 GW/GF <sub>s</sub>	6 CI	7 CH	8 CI/CH	Pilot
$R_{inter}$	0,96	0,96	0,75	0,80	1,00	0,7	0,7	0,50	1,00

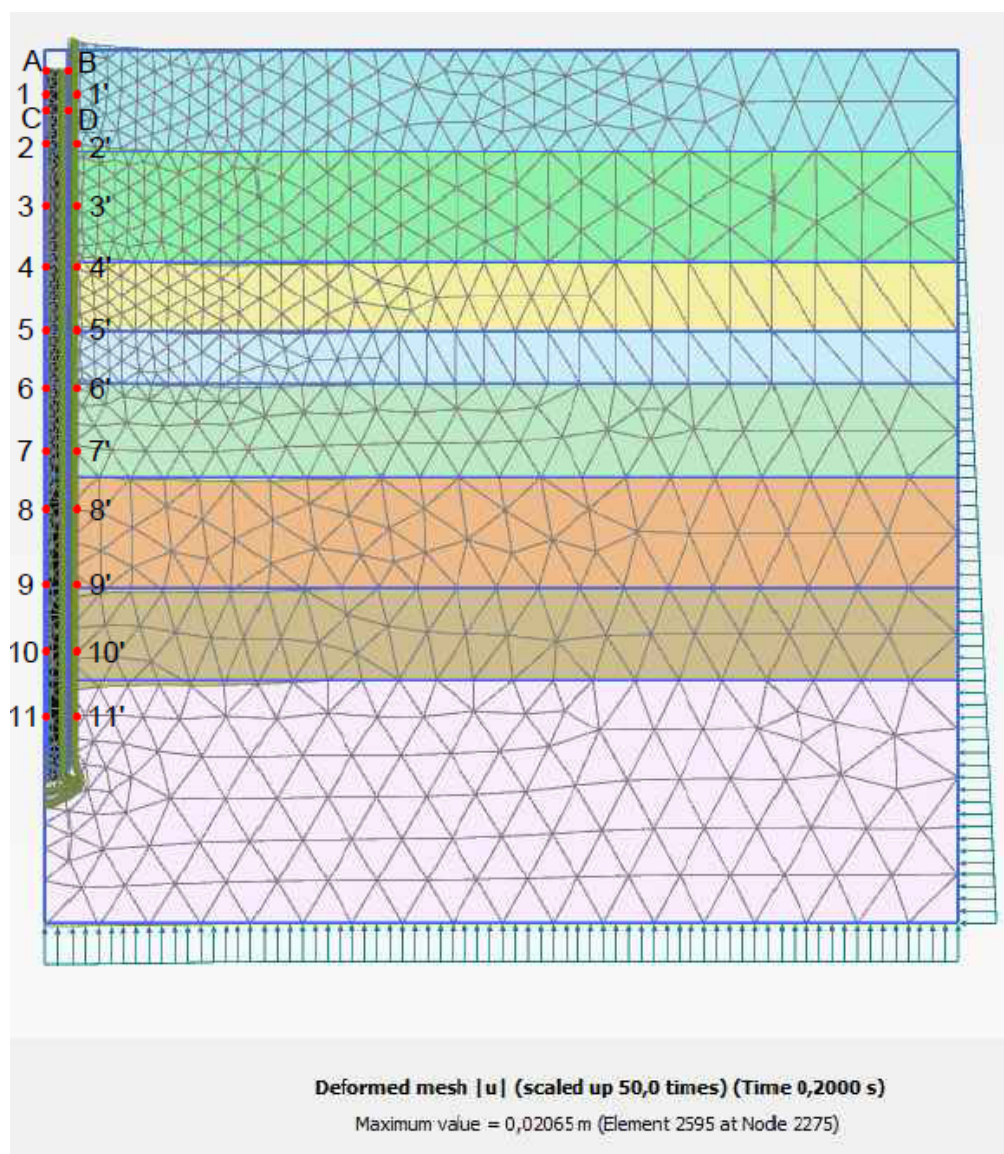
Prije provedbe proračuna potrebno je zadati točke na koje program posebno obrati pažnju i za te točke obavi detaljnije proračune. Kasnije se pomoću podataka dobivenih za te točke mogu crtati dijagrami i raditi analize. Kao karakteristične točke postavljene su točka A, B, C i D. Točke A i B nalaze se na vrhu pilota, s tim da je A u sredini, a B na rubu pilota. Točke C i D odgovaraju pozicijama senzora za mjerenje deformacije i akceleracije. Zadano je još jedanaest parova točaka (1-1', 2-2', 3-3' itd.) čije su pozicije određene pozicijama točaka iz CAPWAP analize (Matković, 2017). Parovi točaka korišteni su tako da se jedna točka para nalazi na sredini pilota, a druga na dodiru tla i interfecea, što je jasno prikazano na slici 7-4. Na slici 7-5 naznačeni su položaji točaka u odnosu na slojeve tla u modelu.



Slika 7-4 Detalj modela sa odabranim točkama

## 7.2. Rezultati proračuna

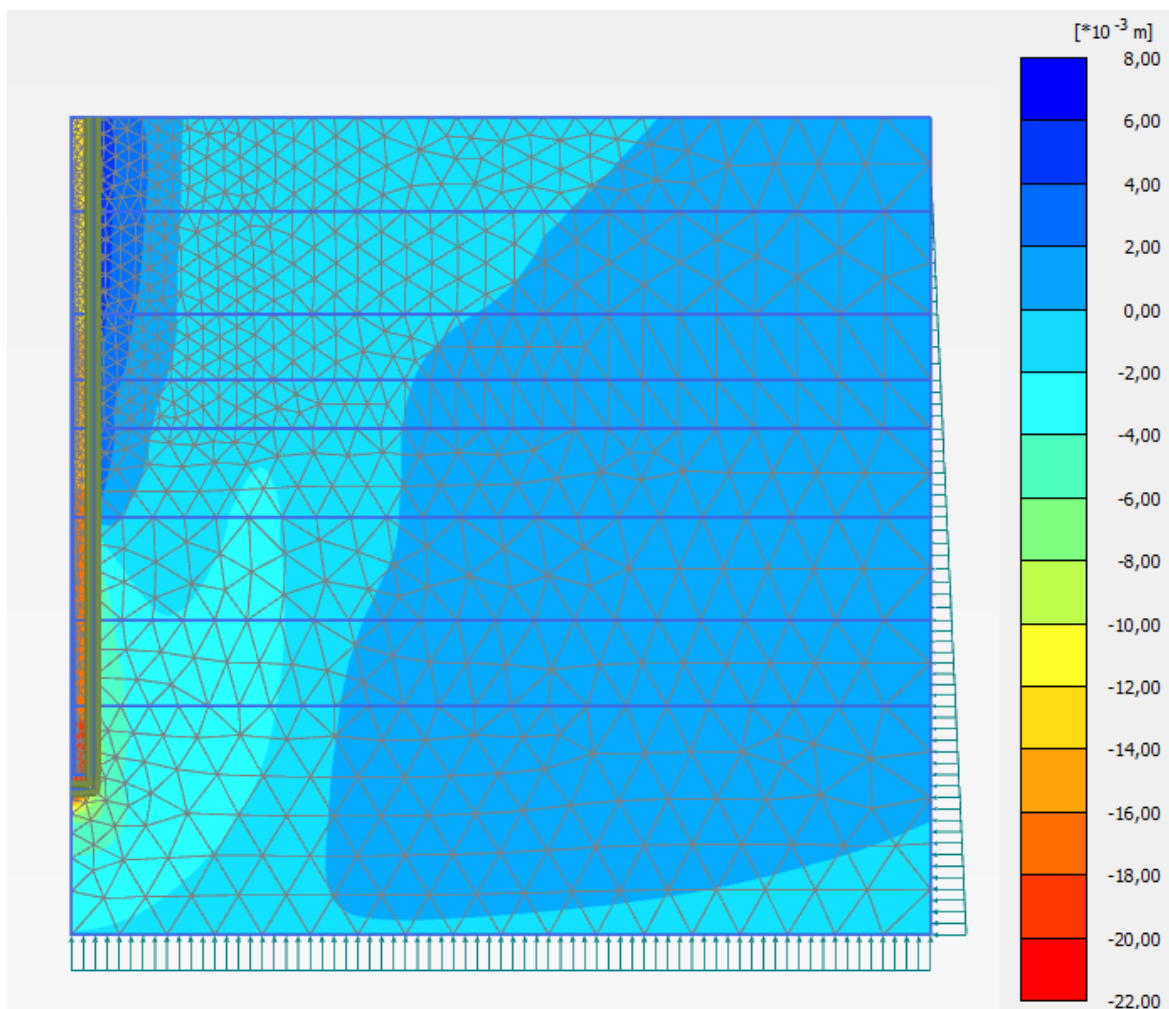
Po završetku proračuna prvi vidljivi rezultat je deformirana mreža elemenata i vrijednost maksimalnog konačnog pomaka koji iznosi 21 mm. Kako bi tako mali pomaci bili vidljivi oni se uvećavaju za neki faktor. U ovome slučaju uvećani su 50 puta. Na slici 7-5 vidljivo je da su rezultati pokusa dinamičkog opterećenja prodiranje pilota u zemlju te prateće deformacije tla. Pri dnu pilota slojevi tla deformiraju se prema dolje, a na vrhu dolazi do izbacivanja.



Slika 7-5 Deformirana mreža

Slika 7-6 prikaz je ukupnih pomaka po y osi. Crvenom bojom naznačeni su maksimalni pomaci u negativnom smjeru, prema dnu modela, koji su izraženi u dnu pilota, a iznose 21 mm. Prema vrhu pilota pomaci se smanjuju do oko 10 mm. Malo ispod sredine pilota jasno

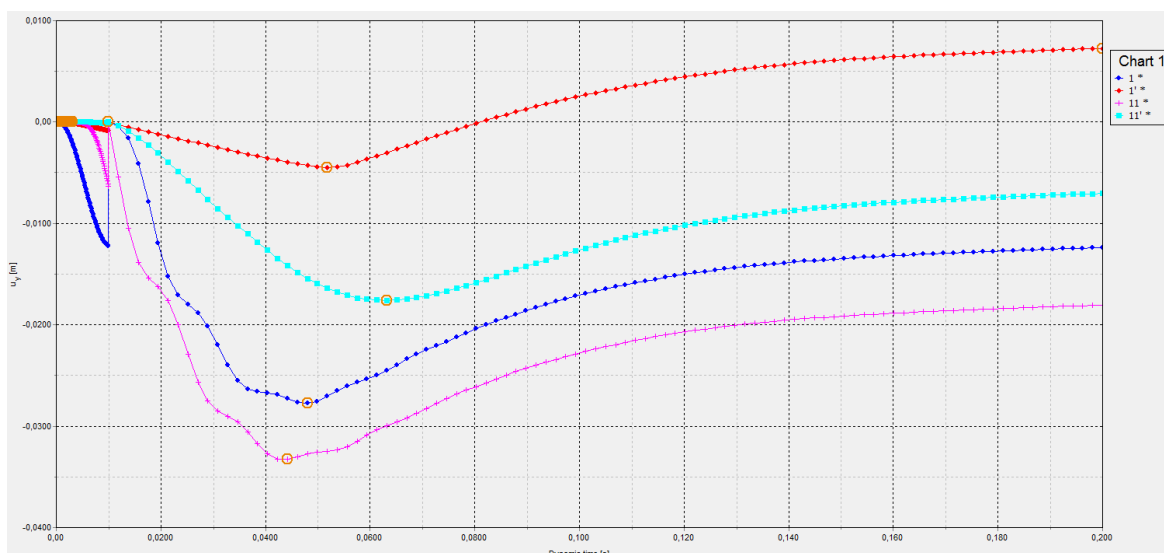
se vidi granica gdje kretanje tla prelazi iz pozitivnog u negativni smjer kretanja. Pri samom vrhu najveće je kretanje tla u pozitivnom smjeru, odnosno izbacivanje, koje iznosi 7,7 mm.



**Slika 7-6** Prikaz ukupnih pomaka po y osi

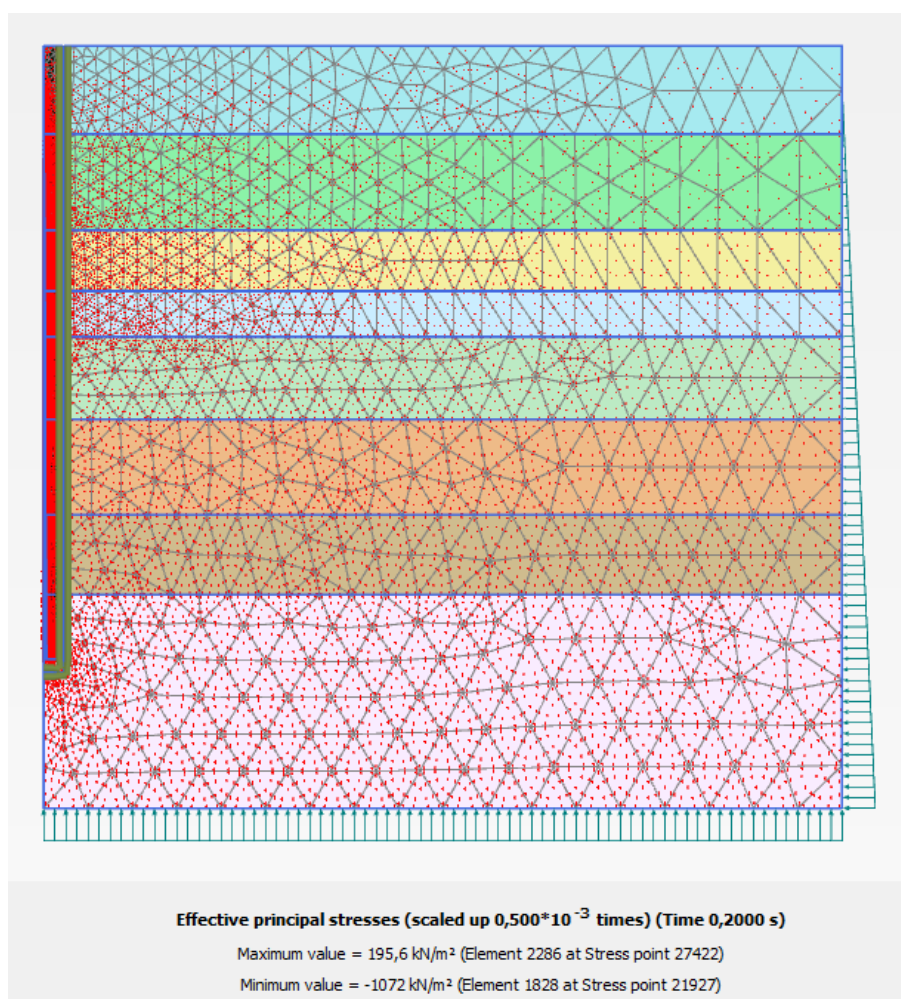
Razlika između ponašanja pilota i tla pod dinamičkim opterećenjem prikazana je na slici 7-7. Plava i crvena krivulja odgovaraju prvom paru točaka 1-1' koje se nalaze na dubini od 2,3 m. Točke 1 i 11 nalaze se na pilotu, a točke 1' i 11' u tlu (slika 7-5). Roza i cijan krivulja odgovaraju drugom paru točaka 11-11' koje se nalaze na dubini od 23 m. Dijagram ukazuje na to da se pomaci u pilotu povećavaju s dubinom. Također, u pilotu su pomaci značajno veći nego u okolnom tlu. Crvena krivulja potvrđuje da pri vrhu modela dolazi do izbacivanja tla. Maksimalno slijeganje događa se oko 0,04 s nakon početka testiranja i iznosi 33 mm. Većina slijeganja događa se u trećoj fazi, u vremenu nakon udarca, jer tlačni val još putuje kroz pilot i uzrokuje slijeganje.





Slika 7-7 Krivulje pomaka po y osi za 4 karakteristične točke

Na slici 7-8 prikazana su glavna efektivna naprezanja. Najviše su naglašena u sredini pilota, i u okolnom tlu. S udaljavanjem od pilota njihova vrijednost opada.



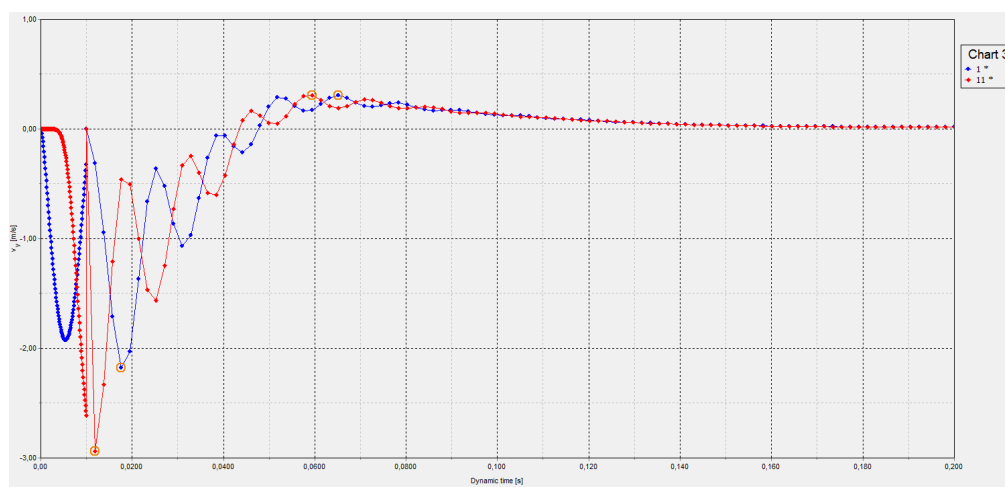
Slika 7-8 Glavna efektivna naprezanja

U tablici 7-5 navedene su vrijednosti maksimalnih posmičnih naprezanja i sila na dodiru slojeva tla i pilota. Generalno događa se rast maksimalnih posmičnih naprezanja s dubinom. Ukupna sila duž plašta pilota iznosi 5910,3 kN što je ispod proračunate nosivosti plašta od 8998 kN.

**Tablica 7-5** Maksimalna posmična naprezanja na dodiru tla i pilota

Tlo	1 CI/CH	2 CI	3 CH	4 CL	5 GW/GF <sub>s</sub>	6 CI	7 CH	8 CI/CH
Maks. posmična naprezanja $\tau$ (kN/m <sup>2</sup> )	9,6	9,6	4,5	18,0	48,0	86,1	86,1	61,5
Sila na plaštu F (kN)	149,2	162,8	48,7	144,2	700,8	1460,3	1216,6	2027,7

Na slici 7-9 prikazane su krivulje brzine u ovisnosti o dinamičkom vremenu. Krivulja plave boje odgovara brzini kretanja točke 1 koja se nalazi na vrhu pilota, a krivulja crvene boje odgovara točki 11 koja se nalazi na dnu pilota. Obje krivulje pokazuju da se gotovo odmah nakon udarca bata postižu vršne vrijednosti brzine, koje se potom smanjuju zbog koeficijenta prigušenja tla (tablica 7-1). Vršna vrijednost za točku 1 iznosi 2,18 m/s, a za točku 11 iznosi 2,94 m/s.



**Slika 7-9** Krivulje brzine u ovisnosti o dinamičkom vremenu

## 8. ZAKLJUČAK

Na projektu izgradnje smještajnog objekta HVU Petar Zrinski u Ilici 256 u Zagrebu analizama nosivosti i slijeganja dokazana je nužnost dubokog temeljenja. Tlo je ispitano do dubine od 30 m. U tablicama 7-1 i 7-2 navedeni su svi podaci dobiveni terenskim i laboratorijskim ispitivanjima. Na pilotu promjera 150 cm, duljine 23 m provedeno je ispitivanje nosivosti dinamičkim postupkom, pomoću jednog udarca čekića mase 12 t. Sila proizvedena tim udarcem iznosila je 30000 kN. Maksimalni trenutni pomak pilota iznosio je oko 13 mm, a trajni pomak 2,50 mm. Interpretirana ukupna granična nosivost pilota  $R_u$  iznosila je 11390,50 kN, s tim da je 2392,5 kN nosivost na bazi i 8998 kN nosivost po plaštu pilota.

Koristeći se poznatim parametrima materijala iz geotehničkog elaborata napravljen je model tla u programu za numeričko modeliranje, Plaxisu. U tlo ugrađen je model pilota, te je također modeliran udarac čekića. Proveden je proračun u četiri faze. U inicijalnoj fazi aktivirano je samo tlo, u prvoj fazi ugrađuje se pilot, u drugoj se aktivira dinamičko opterećenje, a u trećoj ono se deaktivira i promatraju se efekti tog opterećenja u vremenu od 0,19 s. Maksimalni trenutni pomak dobiven proračunom iznosi 33 mm, a maksimalni trajni pomak iznosi 21 mm. Iz maksimalnih posmičnih naprezanja na plaštu pilota proračunate su sile po segmentima plašta čiji zbroj iznosi 5910,3 kN. Prema tome, proračun ukazuje da je zadovoljen uvjet nosivosti po plaštu. Međutim, model ukazuje na to da će pomaci biti veći u dnu pilota nego na vrhu. Brzine valova se također povećavaju s dubinom.

## 9. LITERATURA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 2017. ASTM D4945. Standard test method for high-strain dynamic testing of deep foundations. West Conshohocken: ASTM

BOLTON M.D. 1986. The strength and dilatancy of sands. *Géotechnique*, 36(1), str. 65-78

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. 1999. BS5930:1999. Code of practice for site investigations. London: BSI

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. 2005. BS EN 14199:2005. Execution of Special Geotechnical Works. Micropiles. London: BSI

FINE SPOL S.R.O. 2019. Adhesion coefficient. URL: <https://www.finesoftware.eu/help/geo5/en/adhesion-coefficient-01/> (20.7.2019.)

FLEMING K., WELTMAN A., RANDOLPH M, ELSON K., 2009. Piling Engineering. Treće izdanje. Oxon: Taylor & Francis.

HRVATSKI NORMATIVNI DOKUMENT. 2008. HRN EN 1536:2008 Izvedba posebnih geotehničkih radova – Bušeni piloti. Zagreb: HRN

JUNTAN OY. 2019. Pile driving rigs. URL: <https://www.junttan.com/products/pile-driving-rigs/#classic-series> (20.7.2019.)

MAIR R.J., WOODS D.M. 1987. Pressuremeter Testing, Methods and Interpretation. London: CIRIA and Butterworth.

MATEKOVIĆ D. 2015. Geomehanički elaborat. Zagreb. Projekt Adrion d.o.o., 03D/2015

MATKOVIĆ I. 2017. Izvještaj o probnom opterećenju pilota. Zagreb: Institut IGH d.d., 72220-112/2017



PILE DYNAMICS INC. 2019. About dynamic foundation testing. URL:

<https://www.pile.com/about-dynamic-testing/> (20.7.2019.)

PILING EQUIPMENT LTD. 2018. Geax EK90 CFA Rig. URL: [https://www.piling-](https://www.piling-equipment-ltd.com/store/geax-ek90-cfa-rig/)

[equipment-ltd.com/store/geax-ek90-cfa-rig/](https://www.piling-equipment-ltd.com/store/geax-ek90-cfa-rig/) (20.7.2019.)

RAMSEY N., JARDINE B.M., LEHANE B.M., RIDLEY A.M. 1998. A review of soil-steel interface testing with the ring shear apparatus. Proc. Conf. on Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour, Soc. for Underwater Technology, London, str. 237–258.

RANDOLPH M.F. 1983. Settlement considerations in the design of axially loaded piles. Ground Engineering. 16(4), str. 28-32

SKEMPTON A.W. 1959. Cast in situ bored piles in London clay. Géotechnique, 9, str. 153-173

SMITH I.M., CHOW Y.K. 1982. Three-dimensional analysis of pile drivability. Proc. 2nd Int. Conf. on Numerical Methods in Offshore Pilling. Austin, str. 1–10

VESIC A.S. 1997. Design of Pile Foundations. National Co-operative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice No 42. Transportation Research Board. National Research Council. Washington D.C.